

Thèse

Présentée pour obtenir le titre de DOCTEUR en
Sciences pour l'ingénieur
Option : Génie Civil

EFFET DE LA TEMPERATURE ET DE L'AGITATION SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES BETONS FLUIDES A RHEOLOGIE ADAPTEE

Jing PAN

Soutenue le 30 juin 2015 devant la commission d'examen composée de :

Kamal H. Khayat
Eric Wirquin
Jean Louis Gallias
Ammar Yahia
Georges Aouad
Jean Yves Petit

Directeur de thèse
Directeur de thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

À ma mère, à mon père

RÉSUMÉ

Le climat local, le transport avec l'agitation entre l'endroit de bétonnage et le site de fabrication du béton influencent fortement les propriétés du béton frais et durci. Selon les particularités du béton autoplaçant (BAP), le maintien de l'homogénéité et l'ouvrabilité du BAP avant la mise en place est très important. Les propriétés des BAP sont généralement plus sensibles à la température et au transport par rapport à celles des bétons conventionnels. Une meilleure compréhension de l'effet de la température et de l'agitation sur la performance des BAP est nécessaire pour prévoir les conséquences du changement du climat (température) et de l'effet du transport (temps et vitesse d'agitation), puis pour donner des précautions à suivre afin de répondre à la demande des BAP pour un bon rapport performance-coût.

De manière pragmatique, il s'avère nécessaire d'utiliser la méthode du mortier de béton équivalent (MBE) afin d'analyser rapidement les influences de la température et de l'agitation sur les propriétés rhéologiques, calorimétriques et mécaniques des BAP. Cinq températures (8, 15, 22, 29 et 36°C) et deux vitesses d'agitation (6 et 18 tr/min) ont été étudiées sur les MBE. Ensuite, quelques compositions spécifiques (type d'adjuvant et ajout cimentaire) ont choisies afin de vérifier avec des températures compasse entre 8 à 36°C et les agitations différentes (2 et 6 tr/min) sur les BAP destinés aux travaux de bâtiment (BAP-B) sans agent entraîneur d'air et sur des bétons semi-autoplaçant destinés aux travaux d'infrastructures (BSAP-I) avec agent entraîneur d'air. La fluidité initiale des MBE et BAP a été fixée en faisant varier la demande en SP, la température et l'agitation.

Les résultats montrent qu'il y a un effet important de la température et de l'agitation sur l'efficacité des adjuvants, la fluidité, la teneur en air, les propriétés rhéologiques, calorimétriques et mécaniques des MBE et des BAP. Pour prévoir la performance de MBE à différentes températures, une équation mathématique est proposée pour déduire la demande en SP, la demande en AEA, le flux maximal et la résistance en compression à 1 jour en fonction des mêmes propriétés sur MBE à 22°C et de la température. Enfin, une corrélation linéaire a été trouvée entre les MBE et les BAP sur ces mêmes propriétés.

Mots-clés : béton autoplaçant, température, agitation, rhéologie, propriétés physico-mécaniques

ABSTRACT:

The local climate, the transport of agitated concrete after manufacturing but before being cast strongly influence the properties of the fresh and hard concrete. It's important to keep the stability and workability of the self-consolidating concrete (SCC) because of its special characteristics. Compare to the normal concrete, the properties of SCC are generally more sensitive to the temperature and the transport. Therefore it's necessary to understand the effects of the temperature and the agitation on the performance of the SCC in order to predict the consequences of climate change (temperature) and transport (time and speed of agitation), and then to give the better precautions with a good performance-cost report.

In this study, the concrete mortar equivalent (CEM) method is used to quickly analyze the influences of the temperature and the agitation on the rheological, calorimetric and mechanical properties of the SCCs. Five temperatures (8, 15, 22, 29 and 36 °C) and two agitation speed (6 and 18 tr/min) are varied in CEMs. And then, some compositions (type of adjuvant and supplementary cementing material) are chosen to be valued with the temperature (8-36 °C) and the agitation (2 and 6 tr/min) in SCCs for the building without air-entraining admixture (AEA) and semi-flowable SCC for infrastructure with AEA. The initial slump flow of CEM and SCC is fixed, but the demand superplasticizer, the temperature and the agitation were varied.

The results show that there are the effects of temperature and agitation on the effectiveness of admixture, the slump flow, the air content, the rheological, calorimetric and mechanical properties of CEM and SCC. A mathematical equation is proposed to predict the performance of SCC at different temperatures for the SP and AEA requirement, the maximum of heat flow and the compressive strength at one day by these same properties of SCC at 22 °C and by the temperature. Finally, a good linear correlation is found between CEM and SCC for these properties.

Keywords: self-consolidating concrete, temperature, agitation, rheology, physico-mechanical properties

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier mes parents Jianhe PAN et Xiangyin ZHOU, et mon mari Olivier HU, qui n'ont pas eu beaucoup d'attention de ma part pendant ces années. Je vous remercie pour votre compréhension et votre soutien.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à mes professeurs, Kamal Henri KHAYAT (Professeur de sciences et technologies à l'Université Missouri, USA) et Eric WIRQUIN (Responsable de la Licence Génie Civil à l'Université d'Artois, France), pour avoir dirigé cette thèse. Ses expériences et ses conseils sur le plan expérimental et scientifique m'ont permis d'avancer et d'apprendre toujours plus au long de ses années.

Je remercie mon professeur, Jean-Louis Gallias, ainsi que monsieur Sébastien Remond (Université de Cergy-pontoise, France) de m'avoir présenté et de me donner l'opportunité de travailler à l'Université de Sherbrooke. Ils m'ont aidé à faire mes premiers pas dans le monde de la rhéologie des matériaux cimentaires.

Je souhaite remercier toutes les personnes dans le Groupe de recherche sur le ciment et le béton à l'université de Sherbrooke qui m'ont aidé pour mes multiples analyses. Je remercie en particulier tous les techniciens, madame Ghislaine Luc, messieurs Rajko Vojnovic, Denis Bolduc, Sylvain Roy et Claude Faucher.

Finalement, je voudrais adresser mes profonds remerciements à Safae, Baudouin et tous mes amis à Sherbrooke et à Béthune pour leur encouragement, leur aide sur la langue française et ma vie quotidienne.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	3
ABSTRACT:	4
REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	6
LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	18
LISTE DES ACRONYMES	19
INTRODUCTION	20
CHAPITRE 1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	25
1.1 RECHERCHE SUR LE BETON AUTOPLAÇANT.....	25
1.1.1 HISTORIQUE SUR LE BAP	26
1.1.2 FORMULATION DES BAP.....	26
1.1.3 PRECAUTIONS A APPLIQUER.....	27
1.2 PROPRIETES IMPORTANTES DU BETON AUTOPLAÇANT	28
1.2.1 PROPRIETES RHEOLOGIQUES	28
1.2.2 MECANISMES D'HYDRATATION DU CIMENT	30
1.3 FACTEURS INFLUENÇANT LES PROPRIETES DU BAP	34
1.3.1 FACTEURS INTERNES.....	34
1.3.2 FACTEURS EXTERNES.....	47
1.4 EFFETS DES FACTEURS EXTERNES SUR LES PROPRIETES DU BETON.....	53
1.4.1 EFFET DE LA TEMPERATURE.....	53
1.4.2 EFFET DU MALAXAGE ET DE L'AGITATION AVANT MISE EN PLACE	68
1.5 SYNTHESE	76
CHAPITRE 2 PROGRAMME EXPERIMENTAL.....	78
2.1 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE	80
2.1.1 PARAMETRES DE L'ENVIRONNEMENT CONTROLE	80
2.2.2 PARAMETRES D'ESSAI.....	83
2.3 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES	91

2.3.1 CIMENTS	91
2.3.2 SABLES	93
2.3.3 GRAVILLONS.....	93
2.3.4 ADJUVANTS	94
2.3.5 AJOUTS CIMENTAIRES	95
2.4 MBE ET BETON.....	97
2.4.1 METHODE MBE.....	97
2.4.2 FORMULATION DE MBE ET BAP	98
2.5 PLAN EXPERIMENTAL	100
2.5.1 PHASE I : EFFET DE LA TEMPERATURE ET DE L'AGITATION SUR LES MBE	100
2.5.2 PHASE II : EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LES BAP-B	102
2.5.3 PHASE III : EFFET DE LA TEMPERATURE ET L'AGITATION SUR LES BSAP-I.....	103
2.6 PROCEDURES DE MALAXAGE.....	104
2.7 PROCEDURES D'ESSAI.....	105
2.7.2 ESSAIS BETON	106
2.8 CONCLUSION.....	107
 CHAPITRE 3 EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA PERFORMANCE DES BETONS FLUIDES A RHEOLOGIE ADAPTEE ET DES MORTIERS CORRESPONDANTS	 108
 3.1 EFFET DE LA TEMPERATURE SUR L'ADSORPTION DE SP ET LA SURFACE SPECIFIQUE DES HYDRATES DU MBE-B	 110
3.1.1 ADSORPTION DE SP PAR LA METHODE UV/VIS SPECTROSCOPIE	110
3.1.2 SURFACE SPECIFIQUE DES HYDRATES	114
3.1.3 CONCLUSION	114
3.2 EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA PERFORMANCE DES MBE-B, MBE-P ET DU BAP-B (SANS AEA)	 115
3.2.1 FLUIDITE INITIALE POUR LA DEMANDE EN PC1 FIXEE	115
3.2.2 DEMANDE EN SP POUR LA FLUIDITE INITIALE FIXEE	117
3.2.3 TENEUR EN AIR	121
3.2.4 SEUIL DE CISAILLEMENT	124
3.2.4 VISCOSITE PLASTIQUE.....	127
3.2.6 FLUX DE CHALEUR.....	129
3.2.7 DEBUT DE PRISE	135

3.2.8 RESISTANCE EN COMPRESSION	137
3.3 EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LA PERFORMANCE DU MBE-I ET DU BSAP-I (AVEC AEA)	143
3.3.1 DEMANDE EN SP POUR LA FLUIDITE INITIALE FIXEE	143
3.3.2 DEMANDE EN AEA	146
3.3.3 SEUIL DE CISAILLEMENT INITIAL	149
3.3.4 VISCOSITE PLASTIQUE INITIALE	151
3.3.5 RESISTANCE EN COMPRESSION	152
3.3.6 RETRAIT DE SECHAGE ET DURABILITE	156
3.3.7 CONCLUSION	160

CHAPITRE 4 EFFET DE L'AGITATION ET EFFET COUPLE DE L'AGITATION ET DE LA TEMPERATURE SUR LA PERFORMANCE DES BETONS FLUIDES A RHEOLOGIE ADAPTEE ET DES MORTIERS CORRESPONDANTS..... 164

4.1 EFFET DE L'AGITATION DANS LE TEMPS SUR LA PERFORMANCE DES BAP-B ET BSAP-I ET DES MORTIERS CORRESPONDANTS A 22°C	165
4.1.1 EFFET DE L'AGITATION DANS LE TEMPS SUR LA FLUIDITE A 22°C	165
4.1.2 EFFET DE L'AGITATION DANS LE TEMPS SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES A 22°C	169
4.1.3 EFFET DE L'AGITATION DANS LE TEMPS SUR LA STABILITE DE LA TENEUR EN AIR A 22°C	173
4.1.4 EFFET DE L'AGITATION DANS LE TEMPS SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION A 22°C	175
4.1.5 EFFET DE L'AGITATION DANS LE TEMPS SUR LE RETRAIT AU SECHAGE ET LA DURABILITE DU BSAP-I A 22°C	177
4.2 EFFET COUPLE DE L'AGITATION ET DE LA TEMPERATURE SUR LA PERFORMANCE DES BAP-B ET BSAP-I ET DES MORTIERS CORRESPONDANTS	179
4.2.1 EFFET COUPLE DE L'AGITATION ET DE LA TEMPERATURE SUR LA FLUIDITE DU MBE-B	179
4.2.2 EFFET COUPLE DE L'AGITATION DANS LE TEMPS ET DE LA TEMPERATURE SUR LA PERTE DE FLUIDITE DES MBE-B ET MBE-I	181
4.2.3 EFFET COUPLE DE L'AGITATION ET DE LA TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES RHEOLOGIQUES DES BETONS ET DES MORTIERS CORRESPONDANTS	182
4.2.4 EFFET COUPLE DE L'AGITATION ET DE LA TEMPERATURE SUR LA TENEUR EN AIR DU BSAP-I ET DES MORTIERS CORRESPONDANTS (MBE-I)	188
4.2.5 EFFET COUPLE DE L'AGITATION DANS LE TEMPS ET DE LA TEMPERATURE SUR LA RESISTANCE EN COMPRESSION DU BSAP-I ET DU MORTIER CORRESPONDANT (MBE-I)	189
CONCLUSION :	192

CHAPITRE 5 MODELISATION	194
5.1 PREDICTION DES PROPRIETES DES BAP PAR LEURS MORTIERS CORRESPONDANTS (MBE) AVEC LA METHODE MBE	194
5.1.1 FLUIDITE ET VARIATION DE LA FLUIDITE.....	195
5.1.2 DEMANDE EN SP	196
5.1.3 TENEUR EN AIR	197
5.1.4 PROPRIETES RHEOLOGIQUES	199
5.1.5 DEBUT DE PRISE ET FLUX MAXIMAL	200
5.1.6 RESISTANCE EN COMPRESSION.....	202
5.1.7 CONCLUSION :	204
5.2 PREDICTION DES PROPRIETES DES MBE A DIFFERENTES TEMPERATURES PAR LES RESULTATS OBTENUS A 22°C	205
5.2.1 LA DEMANDE EN SP.....	205
5.2.2 LA DEMANDE EN AEA	209
5.2.3 FLUX MAXIMAL	211
5.2.4 RESISTANCE EN COMPRESSION A 1 JOUR	214
5.2.5 CONCLUSION :	215
5.3 SYNTHESE	215
CONCLUSION GENERALE.....	216
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	221

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Rhéomètre (a) IBB et (b) BML	29
Figure 1.2 : Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un ciment (Garcia, 1999)	31
Figure 1.3 : La variation de la température intérieure d'un béton de masse fluide dans le temps (Pan, 2010).....	32
Figure 1.4 : Influence du laitier sur la chaleur d'hydratation à 20°C comparativement à un ciment type 10 (Kosmatka et al., 2004).....	33
Figure 1.5 : Influence des fumées de silice sur l'évolution de la température du béton (Beaulieu, n.d.)	33
Figure 1.6 : Différentes structures de superplastifiants : a) PNS b) PC.....	35
Figure 1.7: Corrélation entre la pourcentage d'adsorption du PNS et l'étalement testé au mini-cône à 30 min après le contact eau-ciment (Kim et al., 2000).....	37
Figure 1.8 : Pourcentage de PNS adsorbé sur les grains de ciment en fonction du temps à E/ C = 0,35 (Kim et al., 2000).....	37
Figure 1.9 : Pourcentage de PNS adsorbé en fonction du temps après l'addition de Na ₂ SO ₄ (NS) (Kim et al., 2000).....	38
Figure 1.10: Structures principales de PC (Felekoğlu et Sarikahya, 2008)	39
Figure 1.11 : La perte de fluidité (2 h) de BAP à différents dosages de PC (Felekoğlu et Sarikahya, 2008)	39
Figure 1.12: Influence de la concentration en sulfate sur l'adsorption de PC sur les hydrates de C ₃ A (Plank et al., 2010).	40
Figure 1.13 : Adsorption pour PNS (a) et PC (b) (Hanehara et Yamada, 2008)	41
Figure 1.14 : Thixotropie de pâte en changeant le dosage de SP (Phan, 2006)	42
Figure 1.15 : Gain de résistance en compression de bétons contenant 307 kg/m ³ de liant avec un dosage en cendres volantes de 25% en masse (Whiting, 1989)	45
Figure 1.16 : Effet de la fumée de silice sur la résistance en compression (Duval et Kadri, 1998).	46
Figure 1.17 : Différents mécanismes de la chaleur transférée entre le béton et l'environnement (Mauricio ruiz et al., 2001)	48
Figure 1.18 : Facteurs de malaxage qui influencent les propriétés du béton frais (Dehn, n.d.)	51
Figure 1.19 : Variation de l'étalement et de la résistance en compression en fonction du temps de malaxage (Kirca et al., 2002)	51
Figure 1.20 : Adsorption de PC à différentes températures (Yamada et al., 1999).....	53
Figure 1.21 : Influence de la température sur la concentration en PC libre dans le BAP (Ghafoori et Diawara, 2010).....	54
Figure 1.22 : Fluidité de pâte et l'adsorption de PC par surface spécifique de grain de ciment à la température de 5, 20 et 30°C (Yamada et Hanehara, 2001)	55
Figure 1.23 : Perte de fluidité (t ₆₀ -t ₅) en fonction de la température (Adjoudj et Eziane, 2010)	55

Figure 1.24 : Degré d'hydratation en fonction de la température et l'âge du béton (Termkhajornkit et Barbarulo, 2012)	58
Figure 1.25 : Surface spécifique des hydrates en fonction de la température et l'âge du béton (Yamada et al., 1999)	58
Figure 1.26 : Influence de la température de béton sur le dégagement de la chaleur (Wirquin et al., 2008)	59
Figure 1.27 : Seuil de cisaillement en fonction de la température et du temps	61
Figure 1.28 : Viscosité plastique en fonction de la température et le temps	61
Figure 1.29 : Surfaces et courbes iso-réponses de viscosité plastique (gauche) et d'indice de thixotropie (droite) en fonction de la température et du dosage en agent de viscosité (Helnan-Moussa, 2009)	63
Figure 1.30 : (Gauche) Module élastique G' en fonction du temps de repos t_w pour une pâte de ciment à différentes températures et différentes proportions de nanosilice et de superplastifiants. (Droite) Module élastique G divisé par le module de référence G_0 en fonction du temps divisé par le temps caractéristique (Ovarlez et Coussot, 2007)	64
Figure 1.31 : Relation entre la température, l'affaissement et la teneur en air du béton (Lerch, 1960)	65
Figure 1.32 : Variation de la résistance en compression du mortier (a) et du béton (b) (Lothenbach et al., 2007)	66
Figure 1.33 : Consommation de SP en fonction du nombre de tour de malaxage cumulé (Vickers et al., 2005)	69
Figure 1.34 : Effet du prolongement du malaxage et de la température ambiante sur la température du béton (Kirca et al., 2002)	69
Figure 1.35 : Degré d'hydratation d'une pâte de ciment en fonction du temps et de la vitesse de malaxage (Rupnow et al., 2007)	70
Figure 1.36 : Contrainte de cisaillement en fonction de la déformation lors d'un test Vane pour un rapport eau- ciment de 0,4 (Roussel et al., 2012)	71
Figure 1.37 : Etalement en fonction du temps de malaxage à vitesse faible et à vitesse élevée (gauche) et l'étalement en fonction du nombre tour de malaxage cumulé (droite) (Vickers et al., 2005)	72
Figure 1.38 : Viscosité plastique en fonction du temps et de la vitesse de malaxage (Rupnow et al., 2007)	73
Figure 1.39 : Relation entre la durée de l'agitation, la teneur en air et l'affaissement du béton (Kosmatka et al., 2004)	74
Figure 1.40 : Résistance à la compression à trois jours en fonction du temps et de la vitesse de malaxage (Rupnow et al., 2007)	75
Figure 2.1 : Deux agitations à vitesse élevée et vitesse fiable pour le béton et le mortier	81
Figure 2.2 : Estimation du taux d'évaporation d'eau en surface du béton	82

Figure 2.3 : Les cônes pour mesurer l'ouvrabilité	84
Figure 2.4 : Exemple de résultat du rhéomètre (ConTec Ltd., n.d.)	86
Figure 2.5 : Procédure du rhéomètre	86
Figure 2.6 : Vue d'ensemble du dispositif expérimental de calorimètre	88
Figure 2.7 : Murissement des échantillons	89
Figure 2.8 : Granulométrie des sables	93
Figure 2.9 : Granulométrie des gravillons	94
Figure 2.10 : Programme expérimental	100
Figure 2.11 : Organigramme de programme de recherche pour les MBE-B	101
Figure 2.12 : Organigramme de programme de recherche pour les MBE-P	101
Figure 2.13 : Organigramme de programme de recherche pour les MBE-I	102
Figure 2.14 : Organigramme de programme de recherche pour les BAP-B	102
Figure 2.15 : Organigramme de programme de recherche pour les BSAP-I	103
Figure 3.1 : UV/Vis spectroscopie de PC1+eau	110
Figure 3.2 : UV/Vis spectroscopie de PNS+eau	111
Figure 3.3 : UV/Vis spectroscopie de MBE-B-CV sans VEA contenant le PC1 ou le PNS après 40 minutes du contact eau-ciment	112
Figure 3.4 : UV/Vis spectroscopie de MBE-B-CV qui contient le PC1 après 40 minutes du contact eau- ciment	113
Figure 3.5 : Etalement de MBE-B avec le PC1 en fonction de la température	115
Figure 3.6 : Modèle de l'effet de la température sur la variation de fluidité liée au rapport Ad/SSA	116
Figure 3.7 : Dosage en SP en fonction de la température pour le MBE-B avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire	118
Figure 3.8 : Dosage en SP en fonction de la température pour le MBE-P avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire	119
Figure 3.9 : Dosage en SP en fonction de la température pour le BAP-B avec deux types de SP et un seul type d'ajout cimentaire (CV)	120
Figure 3.10 : Teneur en air en fonction de la température dans le MBE-B	122
Figure 3.11 : Teneur en air en fonction de la température dans le MBE-P	122
Figure 3.12 : Variation de teneur en air à différentes températures par rapport la teneur en air à 22°C pour le MBE-B et le MBE-P	123
Figure 3.13 : Teneur en air en fonction de la température dans le BAP-B	123
Figure 3.14 : Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-B avec le PC1	125
Figure 3.15 : Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-B avec le PNS	125
Figure 3.16 : Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-P avec le PC2	126
Figure 3.17 : Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le BAP-B avec le PC1 et le PNS	126

Figure 3.18 : Variation de la viscosité plastique à différentes températures à celle à 22°C dans le MBE-B	127
Figure 3.19 : Variation de la viscosité plastique à différentes températures à celle à 22°C dans le MBE-P-PC2 contenant des CV ou des FS.....	128
Figure 3.20 : Variation de la viscosité plastique à différentes températures à celle à 22°C dans le BAP-B contenant des CV	128
Figure 3.21 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-B contenant des CV avec le PC1	130
Figure 3.22 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-B contenant des CV avec le PNS	130
Figure 3.23 : Flux de chaleur en fonction de temps selon les différentes températures de MBE-P contenant des CV avec le PC2	130
Figure 3.24 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-B contenant le FC avec le PC1	131
Figure 3.25 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-B contenant le FC avec le PNS	132
Figure 3.26 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-P contenant la FS avec le PC2.....	132
Figure 3.27 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de BAP-B contenant des CV avec le PC1	133
Figure 3.28 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de BAP-B contenant des CV avec le PNS	133
Figure 3.29 : Comparaison du flux de chaleur mesuré sur le MBE-B et le BAP-B contenant des CV et deux types de SP à 22°C	134
Figure 3.30: Comparaison la quantité de chaleur dégagée mesurée sur le MBE-B et le BAP-B contenant des CV et deux types de SP à 22°C.....	134
Figure 3.31 : Début de prise du MBE-B et du MBE-P contenant des CV en fonction de la température avec différents types de SP	135
Figure 3.32 : Début de prise du MBE-B et du MBE-P contenant du FC ou de la FS en fonction de la température avec différents types de SP	135
Figure 3.33 : Début de prise du béton (BAP-B) contenant des CV en fonction de la température avec différents types de SP	136
Figure 3.34 : Corrélation du début de prise du BAP-B en fonction de celui du MBE-B	136
Figure 3.35 : Résistance en compression à court terme de MBE-B en fonction de la température avec différents types de SP et d'ajout cimentaire	137
Figure 3.36 : Résistance en compression à court terme du MBE-P en fonction de la température avec différents types d'ajout cimentaire.....	138

Figure 3.37 : Résistance en compression à 1 jour du BAP-B contenant des CV en fonction de la température avec différents types de SP	139
Figure 3.38 : Corrélation de la résistance en compression à 1 jour du BAP-B-CV en fonction de celle du MBE-B-CV	139
Figure 3.39 : Résistance en compression à 28 jours du MBE-B en fonction de la température de mélange initiale	140
Figure 3.40 : Résistance en compression à 56 jours du MBE-B en fonction de la température de mélange initiale	141
Figure 3.41 : Résistance en compression à 28 jours du MBE-P en fonction de la température de mélange initiale	141
Figure 3.42 : Résistance en compression à 56 jours du MBE-P en fonction de la température de mélange initiale	142
Figure 3.43 : Comparaison entre la résistance en compression à 28 jours du MBE-B et BAP-B contenant des CV en fonction de la température de mélange initiale	142
Figure 3.44 : Dosage en SP en fonction de la température pour le MBE-I avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire	144
Figure 3.45 : Dosage en SP en fonction de la température pour le MBE-I avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire	144
Figure 3.46 : Variation du dosage et du type en SP dans le MBE-I et le BSAP-I à différentes températures par rapport à celui à 22°C	145
Figure 3.47 : Demande en AEA en fonction de la température pour le MBE-I avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire	147
Figure 3.48 : Variation de la demande en AEA dans le MBE-I avec le PC1 et le PNS à différentes températures par rapport au dosage à 22°C	148
Figure 3.49 : Demande en AEA en fonction de la température pour le BSAP-I avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire	148
Figure 3.50: Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-I avec le PC1 et deux types d'ajout cimentaire	149
Figure 3.51: Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-I avec le PNS et deux types d'ajout cimentaire	150
Figure 3.52 : Seuil de cisaillement en fonction de la température du BSAP-I contenant des CV	150
Figure 3.53 : Viscosité plastique initiale du MBE-I à différentes températures.....	151
Figure 3.54 : Viscosité plastique initiale du BSAP-I à différentes températures.....	151
Figure 3.55 : Résistance en compression à court terme du MBE-I en fonction de la température avec différents types de SP et d'ajout cimentaire	152
Figure 3.56 : Résistance en compression à 1 jour du BSAP-I en fonction de la température avec le PC1 et les CV	153

Figure 3.57 : Corrélation de la résistance en compression à 1 jour du BSAP en fonction de celle sur MBE-I	153
Figure 3.58 : Résistance en compression à 28 jours du MBE-I en fonction de la température avec différents types de SP et d'ajout cimentaire	154
Figure 3.59 : Résistance en compression à 56 jours du MBE-I en fonction de la température avec différents types de SP et d'ajout cimentaire	155
Figure 3.60 : Résistance en compression à 28 jours du BSAP-I en fonction de la température avec les CV	155
Figure 3.61 : Retrait de séchage du BSAP-I en fonction du temps de séchage dans la salle à 22°C à 50% HR	157
Figure 3.62 : Facteur de durabilité du BSAP-I en fonction du nombre de cycles de gel/dégel	158
Figure 3.63 : Déformation du BSAP-I en fonction du nombre de cycles de gel/dégel	158
Figure 3.64 : Perte de masse en surface de BSAP-I en fonction du nombre de cycles de gel/dégel	159
Figure 4.1 : Variation de la fluidité dans le temps des MBE-B-CV et MBE-I-CV avec le PC1 aux différentes vitesses d'agitation	165
Figure 4.2 : Variation de la fluidité dans le temps des MBE-B-CV et MBE-I-CV avec le PNS aux différentes vitesses d'agitation	166
Figure 4.3 : Variation de la fluidité dans le temps du MBE-B avec CV aux différentes vitesses d'agitation	167
Figure 4.4 : Variation de la fluidité dans le temps du MBE-B avec FC aux différentes vitesses d'agitation	167
Figure 4.5 : La variation de la fluidité dans le temps de BSAP-I-CV avec le PC1 et le PNS aux différentes vitesses d'agitation	168
Figure 4.6 : Propriétés rhéologiques des MBE dans le temps à 6 tr/min par rapport à leurs valeurs initiales	170
Figure 4.7 : Propriétés rhéologiques du MBE-B dans le temps par rapport leur valeurs initiales aux différentes vitesses d'agitation	171
Figure 4.8 : Seuil de cisaillement dans le temps par rapport au seuil initial (t=0) de BAP	172
Figure 4.9 : Viscosité plastique dans le temps par rapport à la viscosité initiale (t=0) de BAP	172
Figure 4.10 : Teneur en air dans le temps du MBE-I-CV avec le PC1 et le PNS aux différentes vitesses d'agitation	173
Figure 4.11 : Teneur en air dans le temps du BSAP-I-CV avec le PC1 et le PNS aux différentes vitesses d'agitation	174
Figure 4.12 : Résistance en compression à 1, 7 et 28 jours du MBE-B-CV avec le PC1 et le PNS coulé après 60 minutes d'agitation aux différentes vitesses d'agitation	175
Figure 4.13 : Résistance en compression à 28 jours du MBE-I-CV avec le PC1 après 0 et 60 minutes d'agitation et aux différentes vitesses d'agitation	176

Figure 4.14 : Résistance en compression à 28 jours du BSAP-I-CV avec le PC1 après 0 minute et 60 minutes d'agitation et aux différentes vitesses d'agitation	177
Figure 4.15 : (a) Retrait de séchage (b) Résistance au gel /dégel (c) Résistance à l'écaillage du BSAP-I à 22°C selon deux agitations différentes (2 tr/min ou 6 tr/min) avant l'échantillonnage.	178
Figure 4.16 : Variation de la fluidité dans le temps du MBE-B contenant des CV aux différentes vitesses d'agitation et températures.....	179
Figure 4.17 : Variation de la fluidité dans le temps du MBE-B contenant du FC aux différentes vitesses d'agitation et températures.....	180
Figure 4.18 : Perte de fluidité après 60 minutes d'agitation des MBE-B et MBE-I avec deux types de SP (PC1 ou PNS) et trois types d'ajout cimentaire (CV, FC ou LT) à différentes températures	181
Figure 4.19 : la perte de fluidité après 60 minutes d'agitation des BAP-B et BSAP-I avec deux types de SP (PC1 ou PNS) à différentes températures	182
Figure 4.20 : Variation du seuil de cisaillement du MBE-B dans le temps à différentes températures	183
Figure 4.21 : Variation du seuil de cisaillement du MBE-I dans le temps à différentes températures	183
Figure 4.22 : Variation de la viscosité plastique de MBE dans le temps à différentes températures	184
Figure 4.23 : Variation de la viscosité plastique de MBE dans le temps à différentes températures	184
Figure 4.24 : Variation du seuil de cisaillement du MBE-B avec les CV selon deux vitesses d'agitation dans le temps à différentes températures	185
Figure 4.25 : Variation du seuil de cisaillement du MBE-B avec les FC selon deux vitesses d'agitation dans le temps à différentes températures	186
Figure 4.26 : Variation des propriétés rhéologiques du BAP-B et du BSAP-I	187
Figure 4.27 : Variation de la teneur en air après 60 minutes d'agitation (6 tr/min) du MBE-I et du BSAP-I avec deux types de SP (PC1 ou PNS) à différentes températures	189
Figure 4.28 : Résistance en compression à 28 jours et teneur en air du MBE-I à la vitesse de 6 tr/min et à différentes températures	190
Figure 4.29 : Résistance en compression à 28 jours la teneur en air du BSAP-I à la vitesse de 6 tr/min et à différentes températures	191
Figure 4.30 : Résistance en compression à 28 jours et teneur en air du MBE-I à la vitesse de 6 tr/min et à différentes températures	191
Figure 4.31 : Résistance en compression à 28 jours et teneur en air du BSAP-I à la vitesse de 6 tr/min et à différentes températures	191
Figure 5.1 : Relation entre l'étalement des BAP-B et BSAP-I et des MBE-B et MBE-I.	195
Figure 5.2 : Relation entre la demande en SP des BAP-B et BSAP-I et des MBE-B et MBE-I.	196
Figure 5.3 : Relation entre la teneur en air des BAP-B et BSAP-I et des MBE-B et MBE-I.	197

Figure 5.4 : Relation de la demande en AEA entre le BAP-B et BSAP-I et le MBE-B et MBE-I.	198
Figure 5.5 : Relation du seuil de cisaillement initial entre le BAP-B et BSAP-I et le MBE-B et MBE-I.	199
Figure 5.6 : Relation de la viscosité plastique initiale entre le BAP-B et BSAP-I et le MBE-B et MBE-I.	200
Figure 5.7 : Relation du début de prise entre le BAP-B et le MBE-B.....	201
Figure 5.8 : Relation du flux maximal entre le BAP-B et le MBE-B	201
Figure 5.9 : Relation de la résistance en compression entre le BAP-B avec les cylindres 160*320 mm et le MBE-B avec les cubes 40*40*40 mm ³	203
Figure 5.10 : Relation de la résistance en compression entre le BSAP-I avec les cylindres 100*200 mm et le MBE-I avec les cubes 50*50*50 mm ³	203
Figure 5.11 : Variation du PC% en fonction de la température pour le MBE-B-PC1	206
Figure 5.12: Variation du PC% en fonction de la température pour le MBE-I-PC1	206
Figure 5.13 : Variation du PC% en fonction de la température pour le MBE-P-PC2.....	207
Figure 5.14: Variation du PNS% en fonction de la température pour le MBE-B-PNS.....	208
Figure 5.15: Variation du PNS% en fonction de la température pour le MBE-I-PNS.....	208
Figure 5.16: Variation d'AEA% en fonction de la température pour le MBE-I-PC1	210
Figure 5.17: Variation d'AEA% en fonction de la température pour le MBE-I-PNS.....	210
Figure 5.18: Variation du flux maximal en fonction de la température pour le MBE-B-CV	212
Figure 5.19: Variation du flux maximal en fonction de la température pour le MBE-B-FC	212
Figure 5.20: Variation du flux maximal en fonction de la température pour le MBE-P-PC2 pour deux types d'ajout.....	213
Figure 5.21: Variation du f'c à 1 jour en fonction de la température pour tous les MBE étudiés. ...	214

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Températures limites des bétons lors de leur mise en place (CSA A23.1).....	49
Tableau 2.1 : Humidité relative et Température dans la chambre environnementale.....	82
Tableau 2.2 : Rhéomètre ConTec pour le béton et le mortier.....	85
Tableau 2.3 : Les essais de durabilité sur les BSAP	90
Tableau 2.4 : Analyse chimique et composition du ciment GU (Canada)	91
Tableau 2.5 : Propriétés physiques du ciment GU (Canada)	92
Tableau 2.6 : Analyse chimique et composition du CEM I 52,5 N CE CP2 NF (France)	92
Tableau 2.7 : Propriétés physiques du CEM I 52,5 N CE CP2 NF (France)	92
Tableau 2.8 : Densités et extraits secs d'adjuvants	94
Tableau 2.9 : Analyse chimique des cendres volantes de classe F	95
Tableau 2.10 : Caractéristiques du filler calcaire	95
Tableau 2.11 : Caractéristiques du Laitier	96
Tableau 2.12 : Caractéristiques de la fumée de silice	96
Tableau 2.13 : Compositions des bétons fluides à rhéologie adaptée	98
Tableau 2.14 : Compositions des MBE	99
Tableau 2.15 : Essais pour le MBE	105
Tableau 2.16 : Essais pour le Béton	107
Tableau 3.1 : les surfaces des hydrates des pâtes à différentes températures après 40 minutes du contact eau-ciment	114
Tableau 3.2 : Viscosité plastique (Pa.s) des MBE-B, MBE-P et du BAP-B à 22°C	127
Tableau 3.3 : Conclusions sur l'effet de la température par rapport à 22°C.....	162
Tableau 4.1 : Propriétés rhéologiques initiales des MBE à 22°C	169
Tableau 4.2 : Propriétés rhéologiques initiales du BAP à 22°C	171
Tableau 4.3 : Propriétés rhéologiques initiales des BAP-B et BSAP-I	187
Tableau 4.4 : Variation de la teneur en air pendant 60 minutes pour deux vitesses d'agitation du MBE-I-CV avec le PC1.....	188
Tableau 4.5: Résistance en compression à 28 jours du MBE-I-CV avec le PC1 coulé juste après le malaxage ou après 60 minutes d'agitation avec deux vitesses différentes	190
Tableau 5.1 : Modèles de prédiction des BAP-B et BSAP-I avec la méthode MBE.....	204
Tableau 5.2 : Coefficient de corrélation et constantes sur la demande en PC	205
Tableau 5.3: Coefficient de corrélation et constante de la demande en AEA	209
Tableau 5.4: Coefficient de corrélation et constantes du flux maximal	211
Tableau 5.5: Coefficient de corrélation et constantes sur la résistance en compression à 1 jour ...	214

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
SP	Superplastifiant
PC	Polycarboxylate
PNS	Polynaphtalène
VEA	Agent de viscosité
AEA	Agent entraîneur d'air
MBE	Mortier de béton équivalent
BFRA	Béton fluide à rhéologie adaptée
BAP	Béton autoplaçant
BAP-B	Béton autoplaçant destiné aux travaux de bâtiment
MBE-B	Mortier de béton équivalent du BAP-B
BAP-P	Béton autoplaçant destiné aux travaux de préfabrication
MBE-P	Mortier de béton équivalent du BAP-P
BSAP-I	Béton semi-autoplaçant destiné aux travaux d'infrastructure
MBE-I	Mortier de béton équivalent du BSAP-I
CV	Cendres volantes (classe F)
FC	Filler calcaire
FS	Fumée de silice
LT	Laitier de haut fourneau

Introduction

Le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé au monde et cela est dû à sa facilité de mise en œuvre, à sa durabilité et à son économie. Depuis plusieurs années, la tendance dans ce domaine, que ce soit au niveau de la conception, de la fabrication ou même des spécifications, est de promouvoir l'utilisation des bétons autoplacants (BAP) qui représentent une nouvelle génération de béton à haute performance. De nombreux chercheurs ont apporté une grande contribution au développement de BAP, comme : H. Okamura (Japon), K.H. Khayat (Canada), O. Wallevik (Iceland), N. Roussel (France), G. De Schutter (Belgium), S. P. Shah (USA), etc. Par leur technologie avancée, ces bétons modifient les méthodes de mise en œuvre traditionnelles et procurent de nombreux avantages. Ils peuvent s'écouler à travers les armatures les plus étroites sans nécessiter une consolidation mécanique et remplir les coffrages sans risques de ségrégation. Ils peuvent être à la fois fluides et stables. Ils permettent de mieux maîtriser les délais d'exécution, de renforcer la sécurité sur les chantiers, de réduire les nuisances sonores, tout en améliorant la qualité des ouvrages finis. Ces types de béton permettent ainsi de réduire la durée et les coûts de construction, d'augmenter la cadence de production et la qualité des bétons préfabriqués et prêts à l'emploi.

La formulation des BAP qui est plus pointue que celles des bétons traditionnels, nécessite la mise en place de procédures de fabrication et de contrôles adaptées. Ils sont formulés de manière à obtenir le compromis optimal entre fluidité et résistance à la ségrégation et au ressuage. Ces propriétés du béton ont été rendues possibles d'influencer par les conditions internes (E/C, granulométrie de granulats, les adjuvants, etc.). En outre, les propriétés rhéologiques et les performances sont influencées par les conditions externes, telles que la température et l'agitation.

Les conditions climatiques lors de la mise en œuvre ont une grande influence sur la qualité finale du béton. La norme CSA A23.1 exige une température de béton lors de leur mise en place comprise entre 5°C et 35°C dépendant de la dimension de l'ouvrage. Mais, on doit prévoir des précautions particulières lorsqu'on estime la température du béton entre 25°C et 35°C ou inférieure à 15°C (Kosmatka et al., 2004). Le béton est sensible à la température qui agit sur la rhéologie du béton et son évolution, la vitesse de prise, la cinétique de durcissement, l'évaporation et la dessiccation du béton. Il convient de se

préoccuper de cette sensibilité aux températures dès la préparation du béton, puis, pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité. Il arrive que les conditions de chantier soient très différentes des conditions optimales envisagées lorsque l'on avait spécifié ou caractérisé le béton. De nombreuses études (Ortiz et al., 2005; Ahmad et Azhar 2004; Schindler et al., 2004; Choi et al., 2011; Shoukry et al., 2011) ont été faites sur les échanges entre l'environnement (température, humidité, vent, etc.) et le béton. La variation de la température du béton peut influencer l'adsorption de superplastifiant (SP) sur les grains de ciment (Yamada et al., 1999; Yamada et Hanehara 2001; Hanehara et Yamada 2008). Les chercheurs de l'Université de Nevada ont étudié l'influence de la température (de -0,5°C à 50°C) sur l'adsorption de polycarboxylate (PC); il y a très peu d'effet de la température sur l'adsorption entre 14 et 36°C, alors qu'à température faible et élevée, l'adsorption peut diminuer (Ghafoori et Diawara, 2010). La variation d'adsorption de SP causé par un changement de température doit, par conséquent, influencer l'efficacité de l'adjuvant donc faire varier les propriétés du béton frais : rhéologie initiale et son évolution dans le temps, la thixotropie, la rétention de maniabilité, etc. Quand la température est élevée, le seuil (Fernández-Altable et al., 2006; Petit et al., 2007; Nehdi et Martini, 2007) et la thixotropie augmentent et la viscosité diminue (Assaad et al., 2003; Roussel et al., 2012a; Helnan-Moussa, 2009). Il y a aussi de nombreuses études menées afin d'élucider l'influence de la température sur les différents mécanismes impliqués durant l'hydratation (Goto et Roy, 1981; Kjellsen et Detwiler, 1992; Kada-Benameur et al., 1997; Wirquin et al., 2008; Termkhajornkit et Barbarulo 2012; Lothenbach et al., 2007; Gallucci et al., 2006).

L'hyper fluidité du BAP conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter la ségrégation et adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre. Il existe une relation entre la fluidité du béton et l'énergie active consommée par le malaxeur lors de la fabrication (Chopin, 2003; Ferraris, 2001). Cette dernière est affectée par le temps de mélange et le nombre de tour cumulé (Vickers et al., 2005). Pour l'effet de la température sur les propriétés des matériaux cimentaires, les études actuelles ont été menées soit avec le même dosage en SP, mais en faisant varier la température, ce qui produit un état de fluidité et une stabilité variables après le malaxage, soit avec la même fluidité initiale, mais avec un dosage en SP différent selon la température. Concernant l'effet de l'agitation sur les propriétés des matériaux cimentaires, très peu de recherches ont été menées. En outre, le BAP contient des dosages élevés en adjuvant, ce qui affecte facilement ses propriétés

par le changement de température et par l'effet de l'agitation. Chaque fabrication de BAP a besoin de beaucoup de matériaux, d'énergie et de temps pour étudier l'effet d'ajouts, d'adjuvants ou de l'environnement sur l'évolution de la performance du BAP. Il est donc intéressant d'utiliser la méthode du mortier de béton équivalent (MBE) pour simplifier et accélérer les études et les analyses. Il y a peu d'études sur la comparaison entre la performance du BAP et celle du MBE, et également sur l'effet de la température et de l'agitation sur le BAP et le MBE. C'est pourquoi, il apparaît nécessaire de mener des études dans ce domaine.

Afin de développer et de promouvoir les bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA), les bétons autoplaçant (BAP) ou les bétons semi-autoplaçant (BSAP), un programme de recherche a été établi dans le cadre d'une chaire industrielle à l'Université de Sherbrooke et regroupant les partenaires de l'industrie du béton canadien. Le principal but du programme de recherche doctoral qui s'inscrit dans le cadre de la chaire industrielle sous la direction de professeur Khayat à l'Université de Sherbrooke est d'étudier l'effet de la température et de l'agitation sur les propriétés des BFRA et des MBE correspondants. Les objectifs spécifiques de l'étude présentée dans cette thèse sont :

- Utiliser la méthode de mortier de béton équivalent (MBE) pour la mise au point des trois types de béton à rhéologie adaptée : béton autoplaçant destiné aux travaux de bâtiment (BAP-B), béton autoplaçant destiné aux travaux de préfabrication (BAP-P), et béton semi-autoplaçant destiné aux travaux d'infrastructures (BSAP-I) ; avec des MBE correspondants : MBE-B, MBE-P et MBE-I.
- Établir une banque de données sur l'effet de la température et de l'agitation sur la demande en adjuvant, les propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité des BAP et des MBE correspondants, en utilisant les différentes plages de température (8,15, 22, 29 et 36°C) et deux vitesses d'agitation (6 ou 18 tr/min pour les MBE et 2 ou 6 tr/min pour les BFRA) dans le temps.
- Étudier l'effet couplé de la température et de l'agitation sur la performance des BFRA et des MBE dans le temps.
- Élaborer une corrélation entre les MBE et les BFRA en fonction de la température.
- Établir des équations afin de prédire les propriétés des MBE à différentes températures à partir des essais réalisés à une température de 22°C.

Cette étude comporte trois phases, chaque phase d'étude comprend différents paramètres d'étude (la température, l'agitation, le type d'adjuvant incorporé et la combinaison des ajouts cimentaires). Les trois phases sont :

- Phase I : Effet de la température et de l'agitation sur la performance des MBE
- Phase II : Validation du BAP sans agent entraîneur d'air (AEA)
- Phase III : Optimisation du BSAP-I avec AEA

La thèse est organisée en cinq chapitres :

Le premier chapitre fait l'état de l'art sur le développement des BAP et les facteurs influençant les propriétés des BAP, notamment les facteurs externes (la température et l'agitation).

Le deuxième chapitre est consacré à la description des paramètres expérimentaux, les caractérisations des matériaux utilisés, les formulations des MBE et des BAP, le plan expérimental et les procédures d'essai.

Dans les chapitres suivants, les résultats expérimentaux sont présentés et commentés. Le chapitre 3 traite de l'effet de la température sur les performances des BFRA et des MBE correspondants sur les formules contenant ou non un AEA. Le chapitre 4 porte sur l'effet de l'agitation et son effet couplé avec la température sur la performance des MBE et des BFRA sans ou avec AEA. Le chapitre 5 est développé dans un premier temps des équations pour valider la méthode MBE sur les BFRA à différentes températures et d'autre part prédire les propriétés des MBE à différentes températures par rapport à celles à 22°C. Enfin, une conclusion et les recommandations suite à projet de recherche sont présentées à la fin de la thèse.

La figure 1 présente l'organigramme qui synthétise les différents paramètres et les propriétés étudiées dans cette thèse.

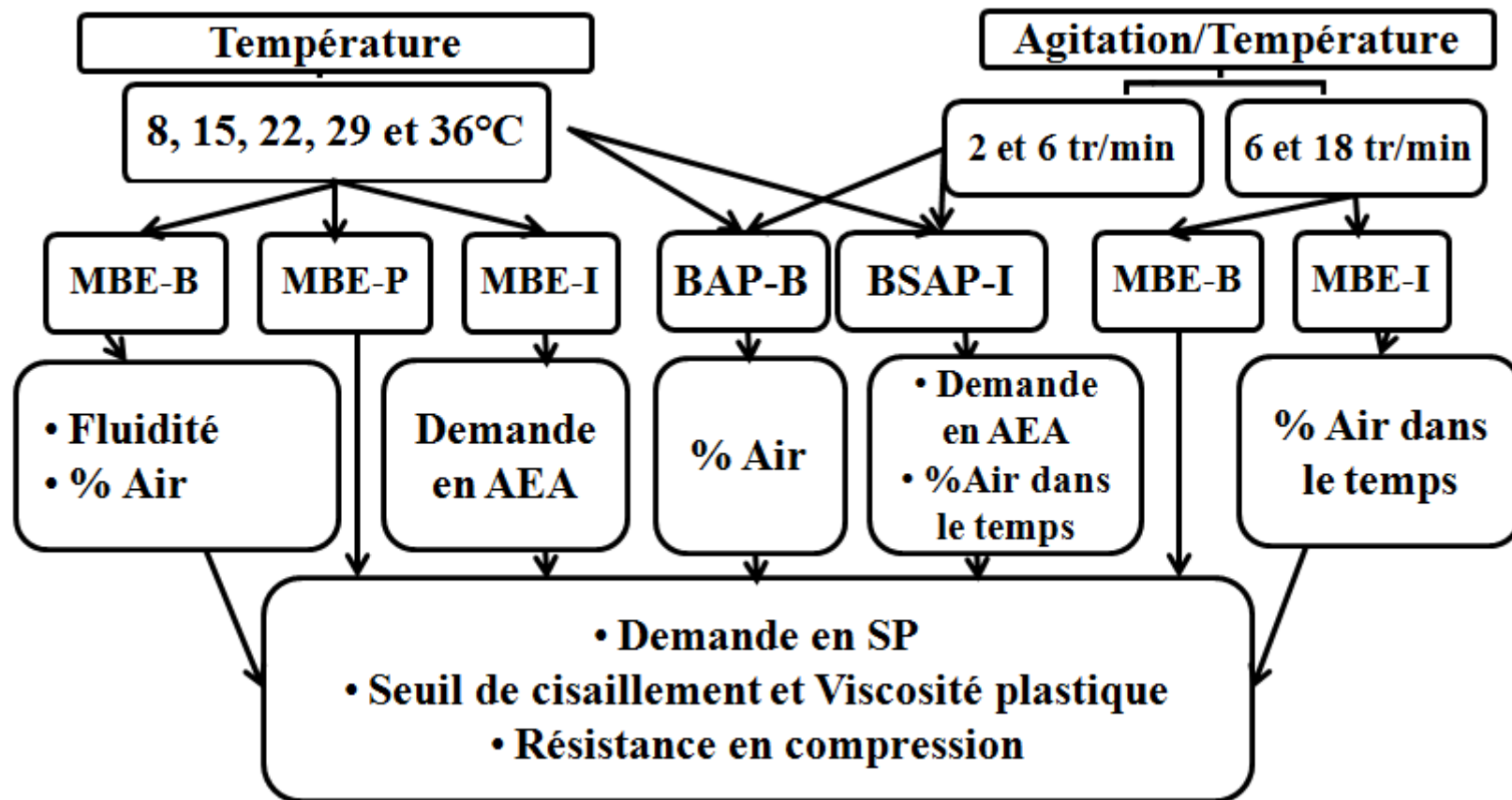


Figure 1 : Organigramme

Chapitre 1 Revue bibliographique

Cette étude bibliographique s'articule autour de trois points. Le premier présente le béton autoplaçant (BAP) : leur histoire de développement, leur formulation spécifique par rapport au béton conventionnel et les précautions nécessaires. Le second décrit les principaux facteurs (internes et externes) influençant les propriétés du béton, notamment sur cette nouvelle technologie de béton (le BAP). L'étude bibliographique se termine sur les effets de la température et du malaxage ou de l'agitation sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton, essentiellement sur quelques propriétés du BAP, qui est le point clé de la thèse.

1.1 Recherche sur le béton autoplaçant

Le BAP représente une nouvelle génération des bétons à hautes performances. Ces bétons possèdent un faible seuil de cisaillement et une viscosité plastique similaire à celle du béton conventionnel. Ils peuvent s'écouler à travers les armatures les plus étroites sans nécessiter une consolidation mécanique (ou très peu) et remplir les coffrages sans risque de ségrégation. Ils doivent être à la fois fluides et stables. Par leur technologie avancée, ces bétons modifient les méthodes de mise en œuvre traditionnelles et procurent de nombreux avantages. Ils conviennent à la réalisation d'éléments de grande hauteur et sont particulièrement adaptés aux ouvrages bruts de décoffrage nécessitant une qualité de parement soignée. Ils permettent de mieux maîtriser les délais d'exécution, de renforcer la sécurité sur les chantiers, de réduire les nuisances sonores, tout en améliorant la qualité des ouvrages finis. De nombreux chercheurs ont apporté une grande contribution au développement de BAP, comme : S. P. Shah (USA), K.H. Khayat (Canada), N. Roussel (France), G. De Schutter (Belgium), O. Wallevik (Iceland), H. Okamura (Japon), etc. Les BAP ont été progressivement utilisés partout dans le monde depuis les années 90.

1.1.1 Historique sur le BAP

Le BAP a été développé dans les années 90 au Japon pour réaliser des structures en béton durable en améliorant le processus de construction et de mise en place, telle que la capacité de remplissage, la résistance de la ségrégation, etc. (Tanigawa et al., 1989; Tangtermsirikul et al., 1991; Ozawa et al., 1990). La recherche et le développement dans le domaine du BAP en Europe a commencé en Suède. En France, les premières applications de BAP datent de 1995. L'utilisation de la technologie du BAP au Japon a été basée sur des superplastifiants (SP) conventionnels pour créer un béton très fluide, et éventuellement celle d'un agent de viscosité (VEA) pour augmenter la viscosité plastique qui empêche la ségrégation. Lorsque la technologie du BAP est arrivée en Europe, son approche a consisté à ajouter des liants (ciment, ajouts cimentaires) passant à 150 µm au tamis pour augmenter la viscosité plastique. Jusqu'en 2003, le Japon et les pays européens ont utilisé du BAP dans la construction de ponts, bâtiments et tunnels. Par contre, aux États-Unis, l'application de BAP pour les routes et les ponts est très limitée jusqu'en 2003 (Ouchi et al., 2003). Après une phase de recherche et plusieurs années de développement régulier, les BAP ont été progressivement testés et adoptés par les entreprises et par les usines de préfabrication pour la réalisation de bâtiments ou de structure de génie civil. En fait, l'objectif du comité technique de l'industrie sur le béton autoplaçant est le « 15 par 15 », soit 15 % du marché du béton de préfabrication occupé par le BAP en 2015.

1.1.2 Formulation des BAP

Les BAP se caractérisent par leur fluidité, un faible ressuage, leur pompabilité ainsi qu'un bon maintien dans le temps de leur ouvrabilité. La formulation des BAP fait appel à :

- Superplastifiant (SP) pour obtenir la fluidité souhaitée.
- Agent de viscosité (VEA) pour une bonne résistance à la ségrégation.
- Fines en quantité élevée pour une bonne maniabilité et stabilité.
- Gravillons en volume faible et diamètre maximal entre 10 à 16 mm pour éviter le blocage.
- Agent entraîneur d'air (AEA) pour contrôler les effets du gel/dégel.

1.1.3 Précautions à appliquer

Riche en éléments fins et en adjuvants, l'hyperfluidité du BAP conduit à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter la fabrication, l'ouvrabilité au temps de transport et de la mise en œuvre. La formulation des BAP, plus pointue que celles des bétons conventionnels, nécessite quelques précautions particulières :

- Malaxage : Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques : ordre d'introduction des adjuvants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés (Hsu et al., 1999 ; Aiad, 2003). Notamment le temps de malaxage du BAP est légèrement plus long que pour un béton conventionnel pour introduire et faire réagir les adjuvants. En effet, le rapport E/L est faible dans le BAP pour une performance demandée, ce qui provoque aussi la prolongation du temps de malaxage. Le dosage de SP et de la fumée de silice ont aussi un effet significatif au temps nécessaire pour homogénéiser le mélange cimentaire (Chopin et al., 2004).
- Transport : On doit envisager trois éventualités (délais, raidissement rapide et séchage, ségrégation) durant la manutention et la mise en place qui pourraient affecter sérieusement la qualité de l'ouvrage fini (Kosmatka et al., 2004). A la fin du transport, le béton doit en effet être encore suffisamment fluide et encore homogène pour éviter les dommages au niveau de la durabilité.
- Pompage : Les performances à l'état frais du BAP permettent leur pompage sur de longues distances et quand la zone de mise en place est difficile d'accès. Le risque de ségrégation est le danger majeur pour le BAP au cours de pompage.
- Coffrage : Le coffrage doit être propre, rigide, étanche et résistant (éventuellement renforcé pour résister à la pression latérale en pied de coffrage) afin de compenser les poussées hydrostatiques du BAP sur les coffrages. L'annulation de la pression latérale est influencée par l'effet chimique qui commence après la fin de la période dormante lorsque le taux d'hydratation du ciment est accéléré (Assaad et Khayat, 2005).

1.2 Propriétés importantes du béton autoplaçant

1.2.1 Propriétés rhéologiques

La description de l'écoulement d'un fluide utilise des concepts tels que la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement (Tattersall et Banfill, 1983). La pâte de ciment, le mortier et le béton peuvent être décrits comme des suspensions viscoplastiques. Cela veut dire qu'en-dessous d'une valeur de contrainte critique τ_0 (le seuil de cisaillement), la matière se comporte comme un solide, mais s'écoule comme un liquide visqueux quand cette contrainte est dépassée ($\tau > \tau_0$). Dans ce cas, la rhéologie des systèmes cimentaires est généralement mesurée en termes des seuils statique et dynamique, de viscosité plastique et de thixotropie. Le type de comportement le plus simple est le comportement linéaire de Bingham :

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$$

Où μ_p = La viscosité plastique

$\dot{\gamma}$ = Le gradient de vitesse.

Pour le BAP, le seuil de cisaillement est plus faible que pour le béton conventionnel, ce qui provoque une bonne déformabilité du béton. La viscosité plastique du BAP est similaire à celle du béton conventionnel afin d'avoir une bonne stabilité. Il est important d'analyser les caractéristiques rhéologiques des matériaux cimentaires afin de satisfaire les différentes applications, par exemple : la réduction de la pression sur les coffrages, l'augmentation de la résistance à la ségrégation dynamique et statique, l'amélioration de la pompabilité, etc. Nombreux facteurs peuvent influencer la rhéologie des systèmes cimentaires, comme les adjuvants, les ajouts cimentaires, les fibres, les différentes compositions, la température, l'énergie et le temps de malaxage etc. Pour cette raison, beaucoup de recherches dans ce domaine ont été effectuées à travers le monde (Banfill, 2006 ; Topçu et al., 2009 ; Kim et al., 2010).

Il y a différents types de rhéomètres qui peuvent être utilisés pour décrire le comportement rhéologique des matériaux cimentaires : le rhéomètre Two-Point (Banfill et Tattersall, 1983), le rhéomètre IBB (modifié par Tattersall) (Beaupré, 1994), le rhéomètre CEMAGREF-IMG (Coussot, 1993), le rhéomètre BTRHEOM (Hu et al., 1996), le

rhéomètre BML (Wallevik, 1990), etc. Des descriptions détaillées des rhéomètres IBB et BML qui sont fréquemment utilisés, sont données ci-dessous :

Rhéomètre IBB : Ce rhéomètre est une version développée de l'appareil existant MKIII (Banfill et Tattersall, 1983). Il été modifié au Canada par Beaupré (Beaupré, 1994) pour étudier le comportement de béton à haute performance, avec une version portable. Le principe de fonctionnement est relativement simple. Un agitateur en forme de H tourne avec un mouvement planétaire dans un récipient contenant un échantillon de 25 litres de béton frais. Le contrôleur impose différentes vitesses de rotation à l'agitateur et pour six paliers en vitesse décroissante, le couple et la vitesse sont enregistrés (Figure 1.1 a).

Rhéomètre BML : Le rhéomètre BML été développé par Wallevik en 1987 à l'Institut norvégien de technologie, à Trondheim. Il existe 4 types de rhéomètre BML : ConTec BML 3 pour mortier et béton, viscomètre ConTec 4 pour pâte et mortier, viscomètre ConTec 5 pour mortier et béton, viscomètre ConTec 6 pour pâte et mortier. Ils s'agissent de rhéomètres à cylindres coaxiaux. Les paramètres de chaque système de mesure sont intégrés dans le logiciel FreshWin. Au lieu de donner les deux paramètres G et H , ils peuvent fournir les paramètres rhéologiques τ_0 et μ_p automatiquement (Figure 1.1 b)

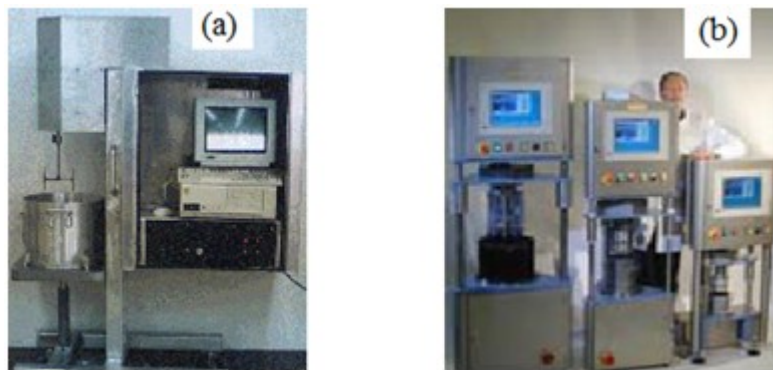


Figure 1.1 : Rhéomètre (a) IBB et (b) BML

1.2.2 Mécanismes d'hydratation du ciment

Mélangés à l'eau, les grains de ciment forment des hydrates qui précipitent et s'organisent en structures en suivant 5 grandes étapes : Adsorption de l'eau à la surface du grain ; Hydrolyse ; Dissolution ; Solvatation ; Cristallisation. La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau. L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau. En mélangeant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment alors adsorbent en surface de l'eau pour produire des composés hydratés. Dans le cas des silicates de calcium C_3S et C_2S , la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de $Ca(OH)_2$ en plaquettes hexagonales alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface des grains de ciment. L'hydratation des silicates (C_3S et C_2S) donnent des C-S-H qui sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et ils possèdent une composition variable. C'est l'enchevêtrement du gel CSH qui donne sa solidité au ciment : les CSH se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices capillaires entre les grains. La pâte devient de plus en plus dure. L'hydratation des aluminates (C_3A et C_4AF) se fait avec la présence de l'eau et du gypse. Il forme rapidement l'ettringite (AFt). Ce dernier devient instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (AFm) dans le temps. L'hydratation de l'aluminate tricalcique contenu dans le ciment Portland engendre une quantité de chaleur considérable (réaction exothermique) ; dans la plupart des pièces de béton, l'augmentation correspondante de température est faible, la chaleur se dissipant rapidement par les surfaces découvertes. Elle peut être avantageuse si elle est modérée, car elle accélère l'hydratation et, lorsqu'on procède par temps froid à des travaux de bétonnage, elle maintient des températures raisonnables qui permettent l'hydratation. Dans le cas des pièces massives de béton, par contre, le rapport de la surface au volume est moindre ; la dissipation de chaleur est retardée de sorte que des températures internes excessives peuvent prendre naissance. Il peut en résulter des hausses rapides de température qui engendrent des fissurations dans le béton. En vue d'éviter les difficultés, il est en général recommandé de maintenir les températures régnant à l'intérieur de la masse

en dessous de 55°C (Gajda et al., 2014). La réaction avec l'eau des différents phases minérales d'un ciment respecte l'ordre suivant : $C_3A > C_3S > C_2S \approx C_4AF$. L'hydratation du ciment présente les mêmes étapes que les deux phases les plus réactives (C_3A et C_3S).

L'hydratation du ciment Portland implique la réaction des quatre phases minérales présentées ci-dessous. La Figure 1.2 présente la courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment qui peut se découper en quatre périodes. Ces périodes peuvent être décrites de la manière suivante (Garcia, 1999):

Période 1 (réactions initiales) : Cette période débute dès le contact eau-ciment et dure quelques minutes. Le C_3S et le C_3A des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H.

Période 2 (période dormante) : Le dégagement de chaleur est faible. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase. Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de la prise se produit. Le pH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.

Période 3 (période d'accélération) : Cette période débute lorsque la concentration en ions Ca^{2+} et OH^- de la solution devenant critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créent donc un solide.

Période 4 (période de ralentissement) : Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. C'est pendant cette période que l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm.

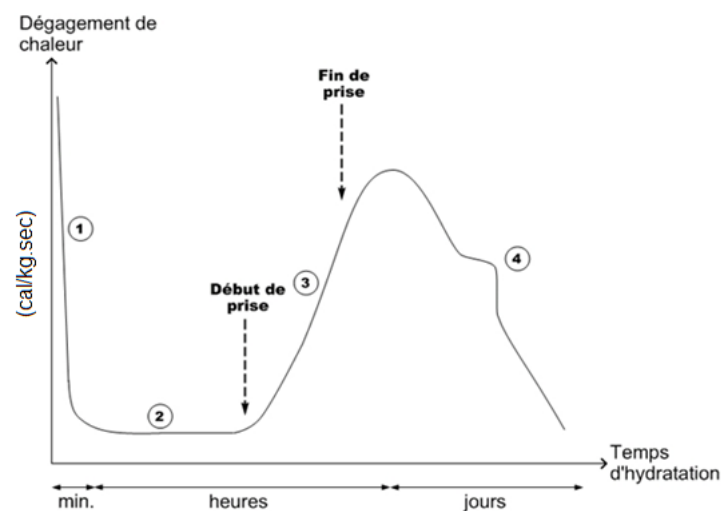


Figure 1.2 : Courbe typique de calorimétrie isotherme d'un ciment (Garcia, 1999)

Le dosage des adjuvants élevés dans le BAP cause une hydratation du BAP différente de celle d'un béton conventionnel. Par exemple, pour le même type de BAP, l'utilisation de différente nature, dosage et combinaison d'adjuvants peut faire varier le dégagement de chaleur et la cinétique d'hydratation, comme on le voit sur la Figure 1.3 sur la variation de la température intérieure d'un béton de masse fluide. L'hydratation du BAP est différente selon les types d'adjuvant incorporés.

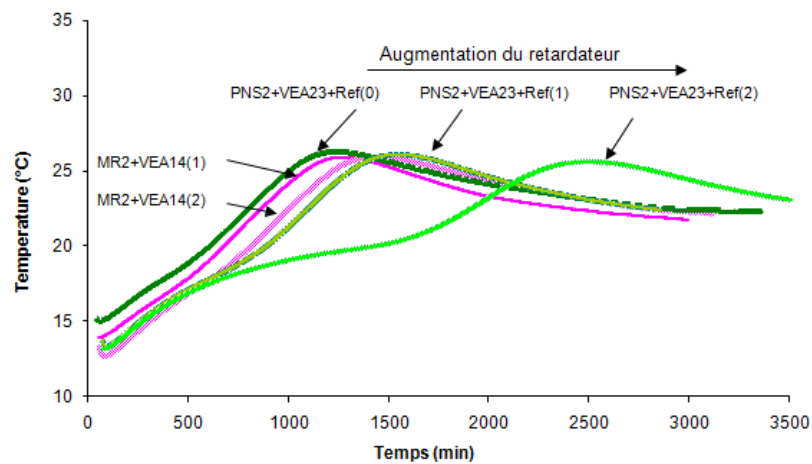


Figure 1.3 : La variation de la température intérieure d'un béton de masse fluide dans le temps (Pan, 2010)

Chaleur, pourcentage d'un ciment type 10 (I) à 28 jours

Temps (jours)

ASTM ciment type I (10)

70 % laitier

Temps (jours)	ASTM ciment type I (10) (%)	70 % laitier (%)
1	55	42
5	85	60
10	95	70
15	100	75
20	103	78
25	105	80
28	105	80

Le graphique illustre l'élévation de température (en °C) en fonction de la teneur en liant (en kg/m³) pour quatre configurations de ciment et de conditions d'essai. Les données sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Teneur en liant (kg/m³)	Ciment type 20M + FS, adiabatique (●)	Ciment type 20M + FS, boîte isolée (■)	Ciment type 20M, adiabatique (○)	Ciment type 20M, boîte isolée (□)
250	28	22	28	20
300	33	24	33	22
360	40	28	40	26
460	51	35	51	32
500	54	32	54	27

Le graphique inclut également des annotations : $\frac{CH}{S}$ pour les courbes adiabatiques et "Boîte isolée" pour les courbes en boîte isolée.

1.3 Facteurs influençant les propriétés du BAP

Les BAP sont formulés de manière à obtenir le compromis optimal entre la fluidité et la stabilité (bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage). Ces propriétés du béton ont été rendues possibles par la considération des facteurs internes (la formulation du BAP, la nature des matériaux utilisés dans le BAP, etc.). En outre, les propriétés rhéologiques et les performances du BAP sont influencées facilement par les facteurs externes (impacts climatiques, transport, malaxage, etc.).

1.3.1 Facteurs internes

Les principaux facteurs internes qui influencent les propriétés rhéologiques et mécaniques du BAP sont : le volume de pâte, le type et le volume de granulats, le rapport E/L et les différents types d'adjuvants et ajouts cimentaires liés à la nature des matériaux utilisés dans le BAP. Ces éléments sont présentés dans les paragraphes suivants :

1.3.1.1 Le volume de pâte

Les BAP ont une composition complexe permettant d'obtenir un seuil de cisaillement faible pour maintenir la fluidité et une viscosité plastique élevée pour éviter la ségrégation. L'augmentation du volume de pâte dans les BAP provoque une augmentation linéaire de la fluidité des BAP (Girish et al., 2010). Il existe un point optimal du volume de pâte. Quand la quantité de pâte dépasse cette limite, la fluidité diminue. Le type de ciment est une cause essentielle sur le retrait du béton. Le volume de pâte élevé dans le BAP donne un retrait important par rapport à celui d'un béton conventionnel (Leemann et al., 2011). La quantité de liant très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte et améliorer la déformabilité du mortier/béton. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions inter-granulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) permet d'en contrôler la fluidité et la viscosité du matériau.

1.3.1.2 Le rapport E/L

Sans agent de viscosité (VEA), le E/L optimal pour le BAP est compris entre 0,29-0,37, Au dessus ou en dessous de ce rapport apparait respectivement le blocage ou la ségrégation du BAP (Felekoglu et al., 2007). Ce rapport E/L peut augmenter grâce à l'incorporation de VEA qui aide à contrôler la stabilité du BAP. Mais l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci (Siddique et al., 2012 ; Leemann et al., 2011). Le dosage du ciment dans le béton est très souvent relié à ses propriétés mécaniques et sa durabilité. On considère que le rapport E/L du BAP représente un facteur très influent sur ces différents aspects.

1.3.1.3 Les Adjuvants :

L'utilisation des adjuvants chimiques dans le BAP est indispensable, notamment, le superplastifiant (SP), l'agent de viscosité (VEA) et l'agent entraîneur d'air (AEA), pour concevoir un équilibre entre la fluidité et la stabilité à l'état frais et pour satisfaire aux autres propriétés demandées, selon les différentes applications.

a) Superplastifiant (SP)

Le SP permet d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée dans ces agglomérats. Ce type d'adjuvant permet soit, à un E/C donné, de rendre le béton plus fluide et plus ouvrable, soit pour une consistance ciblée, de diminuer le E/C du béton afin d'augmenter les résistances mécaniques à court et long terme. Actuellement, il existe deux principaux types de superplastifiant sur le marché avec une structure de molécule différente (Figure 1.6) : le polynaphtalène sulfonate (PNS) et le polycarboxylate (PC).

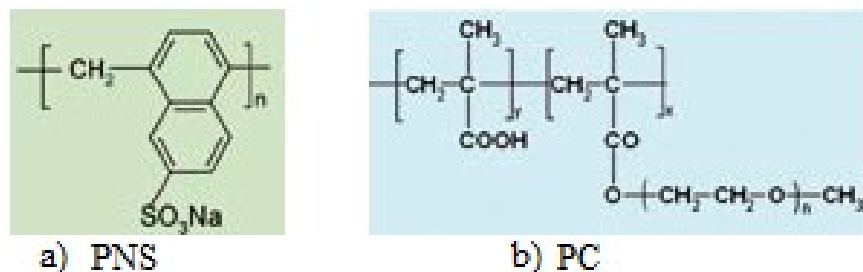


Figure 1.6 : Différentes structures de superplastifiants : a) PNS b) PC

- Polynaphtalène (PNS)

Les molécules de PNS doivent être adsorbées sur les grains de ciment pour développer les forces de répulsion électrostatique. Pour le PNS, les molécules s'adsorbent immédiatement à la surface des grains de ciment après le contact eau-ciment. Les molécules de PNS à structure linéaire induisent un effet fluidifiant principalement par répulsion électrostatique et ont un mode d'action à court et moyen terme (Figure 1.6 a).

Il y a une bonne corrélation entre le pourcentage d'adsorption de PNS sur les grains de ciment et la fluidité du mélange cimentaire dans le temps (Figure 1.7 et Figure 1.8). Plus le pourcentage d'adsorption du PNS sur le grain de ciment est important, plus la perte de maniabilité dans le temps est grande. Moins le PNS est adsorbé par le ciment, plus la combinaison entre le PNS et le ciment est compatible, le mélange cimentaire est alors plus fluide à 30 min (Kim et al., 2000; Prince et al., 2002). La teneur en sulfates alcalins du clinker devient un facteur clé dans la compétition entre les ions SO_4^{2-} et les terminaisons SO^{3-} des PNS lorsqu'il s'agit de neutraliser les sites actifs du C_3A (Aitcin et al., 2001). Pour le PNS, le pourcentage des ions sulfates pour une grande fluidité de la pâte est plus élevé que celui du PC, car le PNS adsorbé sur les C_3A est en concurrence avec les ions SO_4^{2-} (Hanehara et Yamada, 1999). Si le ciment contient une très faible teneur en alcalins, comme par exemple le ciment blanc, il existe un problème de perte de maniabilité dans le temps (incompatibilité) avec le PNS à cause de sa faible teneur en sulfates alcalins (Kim et al., 2000). Afin de corriger cette incompatibilité entre le SP et le ciment, il suffit de rajouter une quantité adéquate d'ions sulfates rapidement solubles dans le béton. Par exemple, l'ajout d'une petite quantité de sulfates de sodium peut réduire la perte de fluidité. La Figure 1.9 montre la diminution du pourcentage de SP adsorbée selon l'augmentation du dosage en sulfate de sodium. De plus, l'adsorption de SP est influencée par les caractéristiques physiques et chimiques des particules de ciment. L'interaction entre le ciment et le SP est un phénomène physico-chimique fort complexe. La morphologie de la surface des grains de ciment également est très importante.

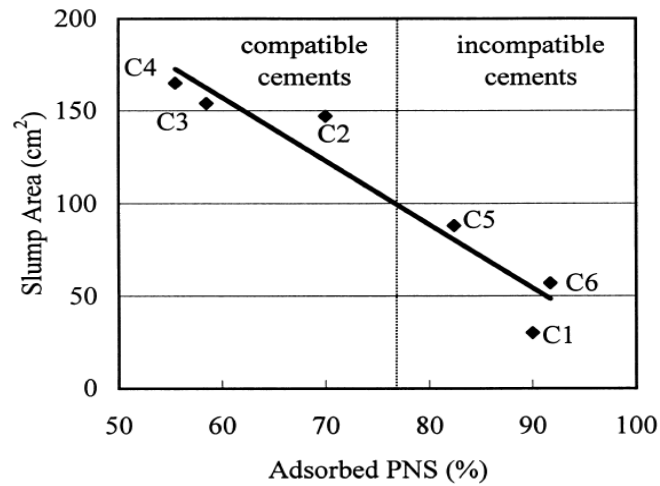


Figure 1.7: Corrélation entre la pourcentage d'adsorption du PNS et l'étalement testé au mini-cône à 30 min après le contact eau-ciment (Kim et al., 2000).

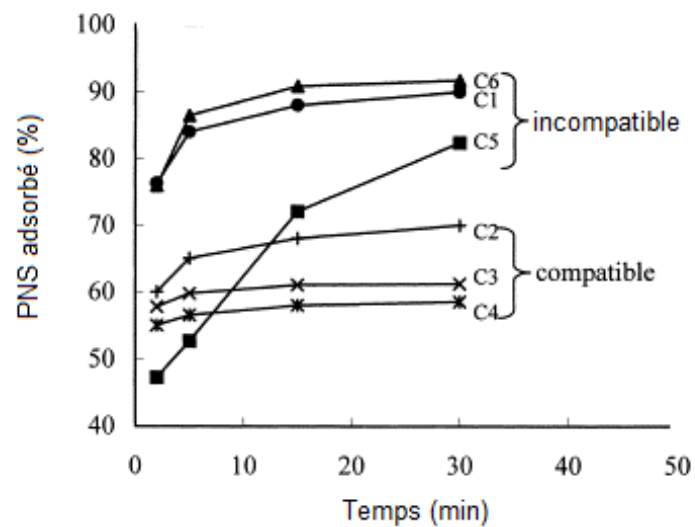


Figure 1.8 : Pourcentage de PNS adsorbé sur les grains de ciment en fonction du temps à $E/C = 0,35$ (Kim et al., 2000)

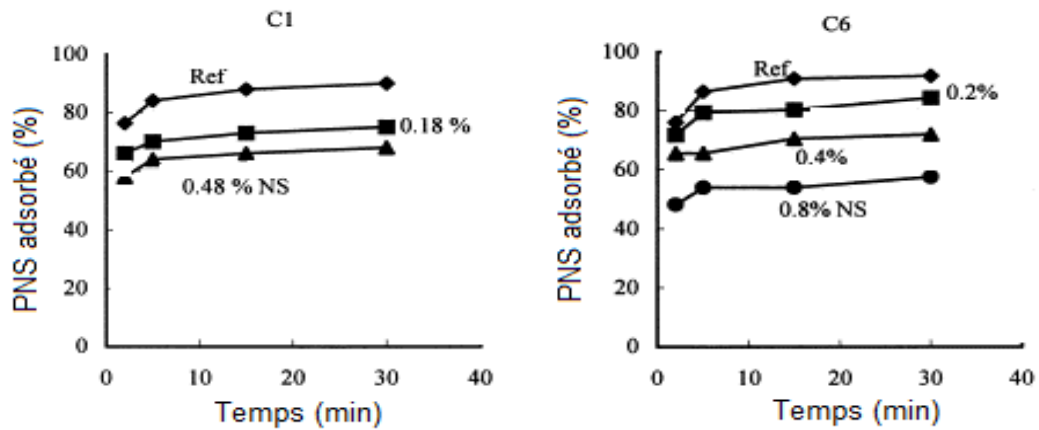


Figure 1.9 : Pourcentage de PNS adsorbé en fonction du temps après l'addition de Na_2SO_4 (NS) (Kim et al., 2000)

- Polycarboxylate (PC)

L'adsorption des polycarboxylates (PC) est différente de celle des PNS, car le PC combine les deux caractéristiques structurales: une partie des charges négatives (groupes carboxyliques) sur la chaîne principale et une partie de charge non ioniques (polyéthylène glycol) liée par l'hydrogène avec les particules de silice sur la chaîne secondaire (Tanaka M et al., 1996 ; Yamada et al., 2001; Plank et al., 2010) (Figure 1.6 b). L'adsorption est déterminée par le groupe carboxylique et la longueur de la chaîne secondaire avec respectivement la répulsion électrostatique et la répulsion stérique. En même temps, la liaison entre la chaîne principale et secondaire peut influencer l'efficacité du PC (Felekoğlu et Sarıkahya, 2008). Ces chercheurs ont étudié sur trois différents types de PC (PC1, PC2 et PC3) (Figure 1.10). Ils montrent que les chaînes secondaires de P1 sont collées à la chaîne principale par une liaison ester, qui peut facilement être cassé par l'influence d'alcalis, cette réaction est appelée « l'hydrolyse ». D'autre part, la liaison oxyde de polyéthylène (PEO) existant dans le PC3 et le PC2 est moins sensible à cette réaction « d'hydrolyse ». Pour cette raison, l'efficacité des chaînes secondaires peut être maintenue sur une durée plus longue. Donc la perte de fluidité du béton peut être influencée par la structure des liaisons entre les chaînes secondaires et principales du copolymère. La liaison ester n'est pas appropriée pour obtenir de longues durées de rétention d'ouvrabilité. Le PC3 avec les liaisons PEO a été trouvé plus intéressante pour la bonne rétention d'ouvrabilité du béton (Figure 1.11).

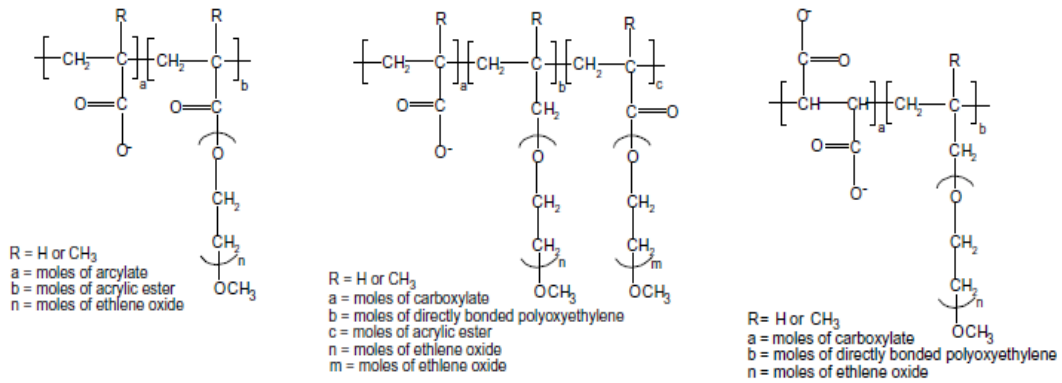


Figure 1.10: Structures principales de PC (Felekoğlu et Sarıkahya, 2008)

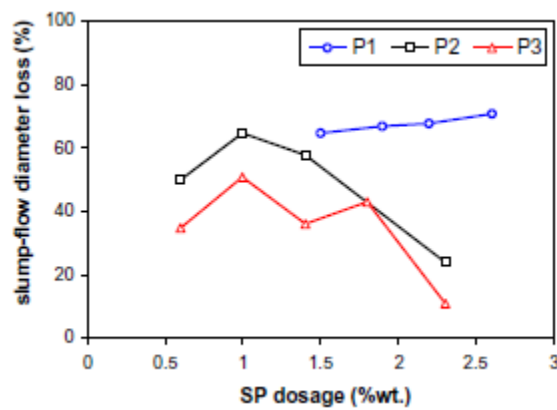


Figure 1.11 : La perte de fluidité (2 h) de BAP à différents dosages de PC (Felekoğlu et Sarıkahya, 2008)

Yamada (Yamada et al., 2001) a suggéré que l'adsorption de PC diminue quand la concentration en ions sulfates est grande dans la phase aqueuse affectant ainsi le niveau de rétention d'ouvrabilité dans le temps. À concentration faible de SO_4^{2-} , lorsque les hydrates de C_3A sont en présence de PC, l'intercalage de PC ou l'interstratification de PC et SO_4^{2-} se produit (Figure 1.12). L'intercalage de PC peut également contenir une certaine quantité de sulfate alkali, qui entre dans la structure PC - double couche hydrates de C_3A (PC - LDH). En outre, PC s'adsorbe sur les surfaces des particules positives PC - LDH. Cependant, il n'y a pas de phénomène d'intercalage de PC avec les hydrates de C_3A à concentration élevée en SO_4^{2-} . Dans ce cas, le monosulfoaluminate est plus stable thermodynamiquement et l'ettringite se formera en plus grande quantité (Figure 1.12 c). Une fois que le monosulfoaluminate ou l'ettringite ont été formés, le PC s'adsorbe sur la surface cationique

de l'AFm et des particules de AFt (Plank et al., 2010). L'efficacité des PC qui dispersent les grains de ciment et qui évitent leurs floculations est directement liée à l'adsorption des SPs à la surface des particules.

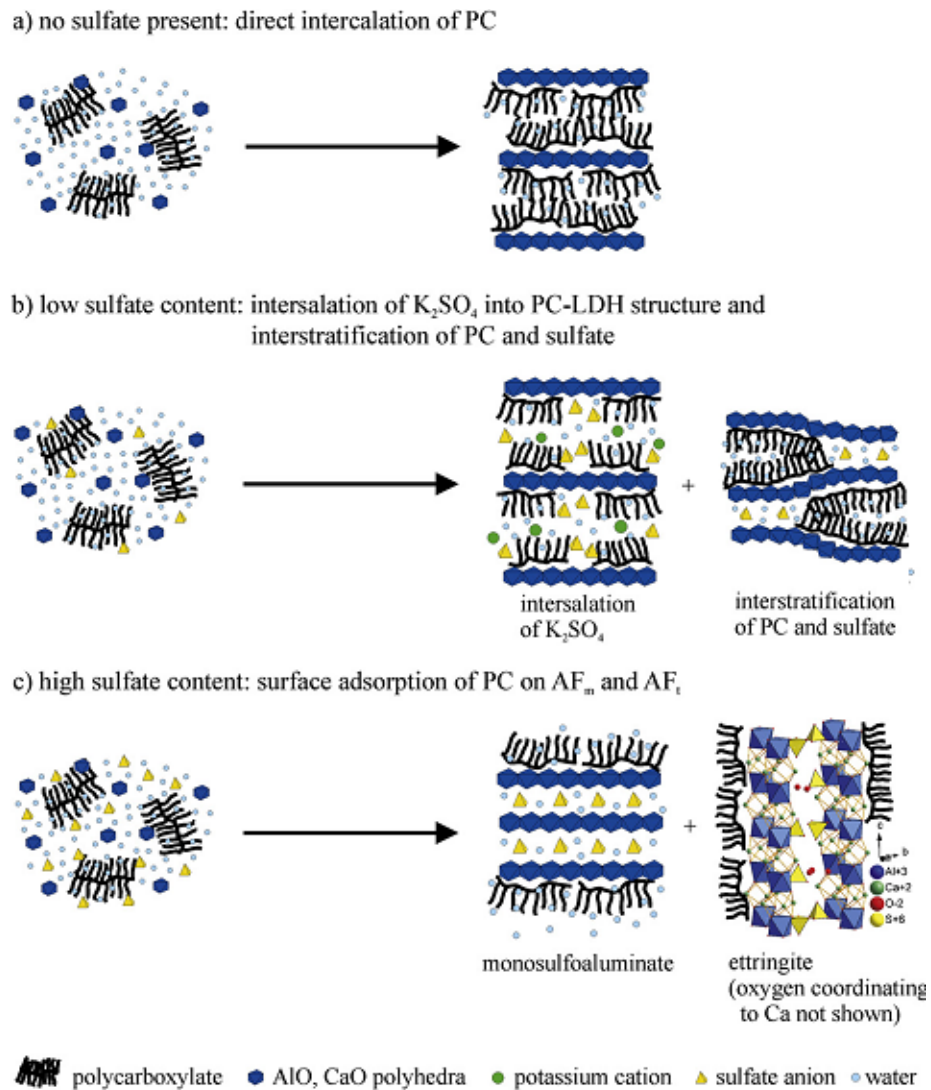


Figure 1.12: Influence de la concentration en sulfate sur l'adsorption de PC sur les hydrates de C_3A (Plank et al., 2010).

Yamada (Hanehara et Yamada, 2008) montre une relation entre la fluidité de la pâte de ciment et le PC, et l'évolution de la fluidité en fonction du temps. Il montre que la différence de fluidité peut s'expliquer par le rapport Ad (adsorption de PC) / SSA (surface spécifique des hydrates). Le changement de fluidité dans le temps peut ainsi s'expliquer par ces deux paramètres. Le concept principal de cette théorie est montré dans la Figure 1.13. Yamada depuis 1999 étudie l'adsorption de SP, il a développé deux modèles afin d'expliquer la pouvoir de dispersion (efficacité) des PC et des PNS. L'efficacité des PC est liée directement au pourcentage d'adsorption sur le grain de ciment et la surface spécifique des hydrates, alors que celle de PNS est liée directement à l'adsorption mais cette dernière est difficile à estimer, parce que les molécules de PNS peuvent être absorbées par les hydrates et adsorbées sur les hydrates en même temps (Hanehara et Yamada, 2008).

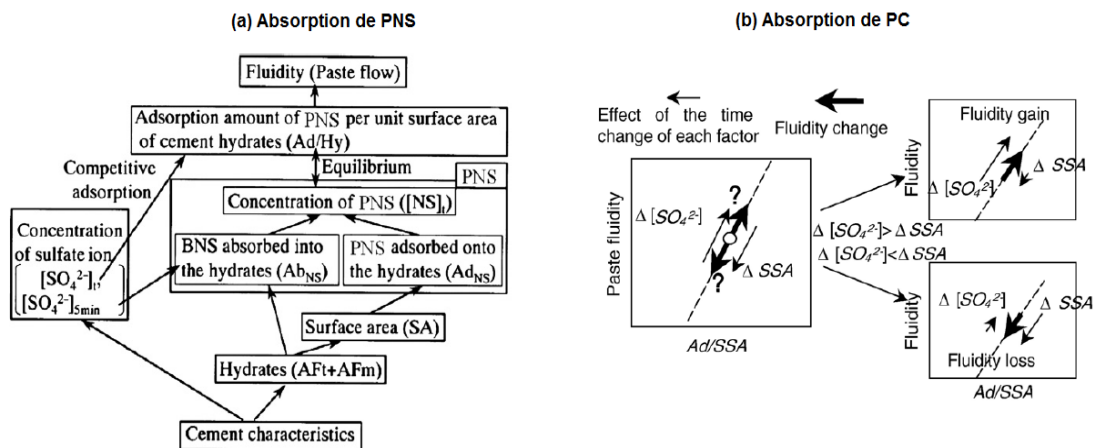


Figure 1.13 : Adsorption pour PNS (a) et PC (b) (Hanehara et Yamada, 2008)

La capacité d'adsorption des adjuvants sur les grains de ciment va fortement influencer la capacité de reprise de la viscosité ou la capacité de re-floculation. Selon l'étude de Phan (Phan, 2006), la quantité de superplastifiant ne change pas la capacité d'hydratation de la pâte de ciment. Plus le dosage en superplastifiant est élevé, plus la capacité de reprise de la viscosité diminue (Figure 1.14).

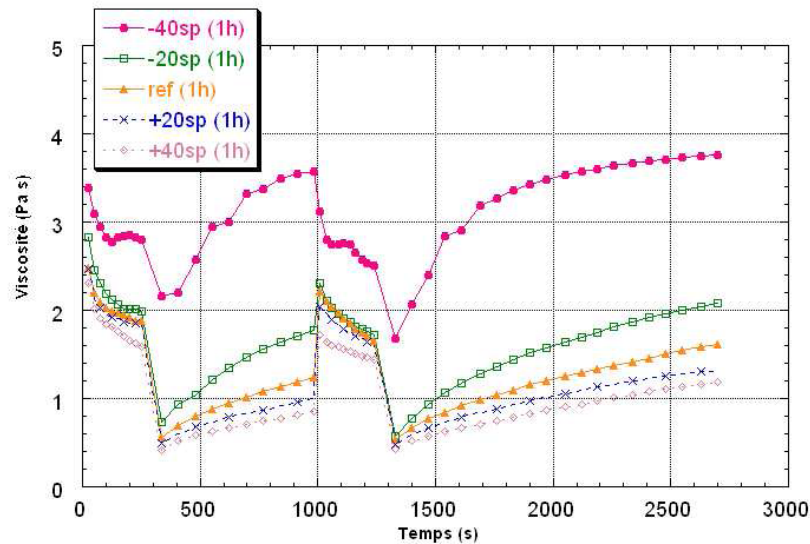


Figure 1.14 : Thixotropie de pâte en changeant le dosage de SP (Phan, 2006)

b) Agent de viscosité (VEA)

Les agents de viscosité sont des produits généralement épaississants ou gélifiants qui augmentent la viscosité. Le BAP idéal se caractérise par l'équilibre entre la fluidité et la stabilité, ceci signifie que la combinaison de SP/VEA est compatible. Les VEA sont composés de molécules de longues chaînes de polymères qui vont alors stabiliser l'eau interstitielle en la rendant plus visqueuse et collante, empêchant ainsi la tendance naturelle des particules lourdes de « tomber » au fond du béton (ségrégation). Selon Khayat (Khayat, 1998), il y a trois types de mode d'action.

- Adsorption : les molécules d'agent de viscosité adsorbent l'eau et prennent de l'expansion.
- Association : les différentes particules développent des liaisons de Van der Waals et des ponts hydrogène sur leur site de surface.
- Chevauchement : à concentration élevée, les polymères se manifestent par un chevauchement.

Le VEA ne réagit pas avec les grains de ciment ni les ajouts cimentaires, mais il est en concurrence avec le SP adsorbé sur les sites actifs sur les grains de ciment. Par conséquent, le VEA peut changer l'adsorption du SP à la surface du ciment (Claude Bedard et Mailvaganam, 2006), ce qui peut donner une incompatibilité quand on ajoute le SP et le VEA ensemble dans le mélange cimentaire. L'eau absorbée par le VEA cause une diminution de l'eau libre dans le mélange avec l'AEA, ce qui provoque une augmentation

du dosage en AEA afin d'avoir la teneur en air fixée. Le VEA interfère ainsi la précipitation des minéraux dans la solution, ce qui influence le taux d'hydratation et le temps de prise (Saric-Coric et al., 2003).

c) Agent entraîneur d'air (AEA)

Les agents entraîneur d'air (AEA) sont des adjuvants qui permettent d'entraîner, à l'intérieur des mortiers et des bétons, de petites bulles d'air de taille régulière, réparties de façon stable et homogène grâce aux turbulences générées par les pales du malaxeur et les particules fines et grossières. Ce réseau est composé de bulles dont le diamètre varie de 10 à 300 μm , uniformément réparties dans la masse du mélange. Ces microbulles vont jouer le rôle de vase d'expansion (chambres d'expansion) au niveau du front de gel et éviter l'éclatement du béton. On constate, cependant, une diminution des résistances mécaniques non compensées par la réduction de la quantité d'eau. Les agents entraîneurs d'air font les petites bulles d'air adhérant aux grains de ciment. Il existe également des interactions à l'interface solide-liquide-air. En général, plus le ciment est fin, plus le dosage en AEA doit être augmenté. Les propriétés des cendres volantes, notamment la concentration de carbone imbrûlé dans les cendres volantes, influence le dosage d'AEA nécessaire dans le béton (Freeman et al., 1997; Hill et al., 1997; Baltrus et La Count, 2001; Stencil et al., 2009).

1.3.1.4 Les ajouts cimentaires

Les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice et le filler calcaire sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Ces matériaux sont généralement catégorisés comme ajouts cimentaires ou ajouts minéraux (Kosmatka et al., 2004). Pour améliorer de façon considérable les propriétés rhéologiques du BAP, il faut généralement utiliser une quantité non négligeable de fines. Dans la formulation des BAP, une partie du ciment est remplacé par des ajouts cimentaires moins réactifs (fillers calcaires, cendres volantes) mais qui gardent des caractéristiques chimiques intéressantes au niveau du développement des résistances mécaniques à court et à long terme.

a) Cendres volantes (CV)

Les cendres volantes sont un ajout cimentaire le plus fréquemment utilisé dans le béton. La dimension des particules de cendre volante est comprise entre moins de 1 μm et plus de 100 μm , avec une dimension caractéristique de moins de 20 μm . La surface spécifique est généralement comprise entre 300 et 500 m^2/kg . Les cendres volantes ne peuvent pas réagir, mais ils peuvent augmenter la réactivité du ciment portland et améliorer la durabilité du béton (Shayan et al., 1996 ; De Weerd et al., 2011; Nath and Sarker, 2011). Deux types de cendres volantes sont utilisés souvent dans le béton, le type F et le type C, définis dans la norme CSA A23.5. Le type F a une faible teneur en calcium (moins de 8% de CaO) et une teneur en carbone de moins de 5%. Le type C a une teneur plus élevée en calcium mais une teneur en carbone faible (moins de 2%). Les cendres volantes sont souvent utilisées à un dosage de 15 % à 25 % par masse de matériaux cimentaires, alors que pour le type C, le dosage peut augmenter jusqu'à 40 % (ACI Committee, 1993). Remplacer une partie de ciment par les cendres volantes améliore l'ouvrabilité et diminue le risque de ségrégation et de ressuage du béton. Mais la quantité d'adjuvant entraîneur d'air nécessaire pour obtenir une teneur en air donnée est normalement plus grande en cas d'utilisation de cendres volantes. En comparaison, le type C demande moins d'agent entraîneur d'air que les centres volantes de type F et a tendance à perdre moins d'air durant le malaxage (Kosmatka et al., 2004). Les cendres volantes réduisent la quantité de chaleur qui s'accumule dans une structure de béton en raison de leur chaleur d'hydratation moins élevée que celle du ciment portland. Le délai de prise du béton s'allonge. La présence des cendres volantes contribue au gain de résistance du béton (Pathak et Siddique, 2012). Mais le taux d'accroissement de la résistance à la compression en fonction du temps (Figure 1.15) est différent de celui des bétons qui ne contiennent que du ciment portland (Whiting, 1989).

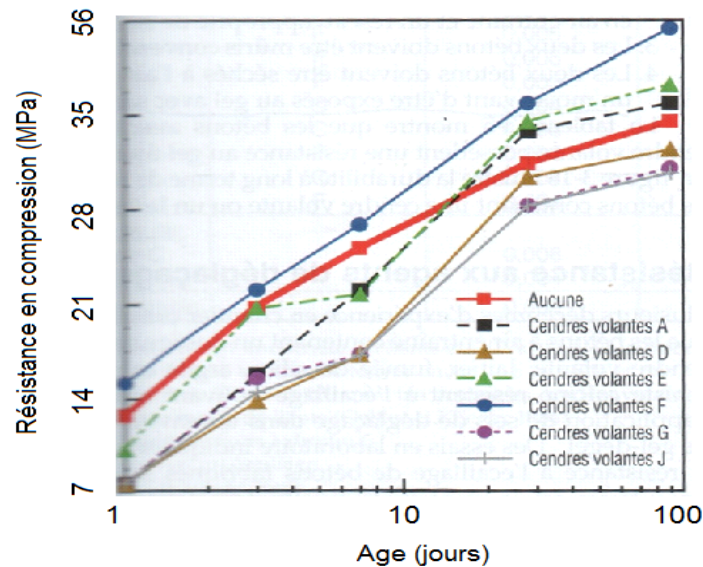


Figure 1.15 : Gain de résistance en compression de bétons contenant 307 kg/m^3 de liant avec un dosage en cendres volantes de 25% en masse (Whiting, 1989)

b) Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut-fourneau est un liant hydraulique non métallique qui est composé essentiellement de silicates et d'aluminosilicates de calcium. Le laitier a une taille de moins de $45 \mu\text{m}$. Il possède une finesse Blaine d'environ 400 à $600 \text{ m}^2/\text{kg}$. En Amérique du nord, le laitier dans le béton à usage général, constitue normalement entre 30 % et 45 % de matières cimentaires (PCA, 2000) et certains bétons peuvent atteindre 70 % de laitier. Le laitier seul n'a pas de propriétés hydrauliques, c'est-à dire qu'en le mélangeant avec l'eau, il ne durcit pas (Taylor, 1990). Ca(OH)_2 , NaOH et CaSO_4 sont les activateurs les plus typiques de l'hydratation du laitier (Daimon, 1980). Deux activateurs du laitier sont présents dans les ciments : le gypse et la chaux libérée par l'hydratation des silicates du clinker. Généralement le laitier diminue la demande en eau de 1 à 10% selon le dosage. La finesse du laitier contrôle le ressuage ou la ségrégation du béton, les laitiers plus fins donnent un effet significatif. Ainsi le laitier réduit la quantité de chaleur générée pendant la prise du béton. De l'ajout de laitier dans le ciment résulte habituellement une réduction de la quantité d'eau requise et du temps de prise, une pompabilité et une facilité de finition améliorées, une plus grande résistance à 28 jours, une perméabilité réduite, une résistance accrue aux attaques des sulfates et aux réactions alcali-silice (RAS) ainsi qu'une coloration plus légère (Kosmatka et al., 2004).

c) Fumée de silice

La fumée de silice est issue de la réduction du carbone et du quartz de très grande pureté dans un four à arc électrique. Elle est composée essentiellement de dioxyde de silice (plus de 85%) sous forme amorphe. La fumée de silice est extrême fine, avec un diamètre moyen de $0,1\ \mu\text{m}$, soit environ 100 fois plus petit que la dimension moyenne des grains de ciment. La concentration peut se faire à hauteur de 5 % à 10 % de la masse de liant (Duval et Kadri, 1998 ; Kosmatka et al., 2004). La demande en eau du béton augmente avec l'augmentation de la quantité de fumée de silice (Duval et Kadri, 1998; Kosmatka et al., 2004). Grâce à la finesse élevée de la fumée de silice, elle est très efficace pour réduire le ressuage et la ségrégation. Les ajouts cimentaires améliorent généralement la perméabilité du béton (Güneyisi et al., 2012), mais c'est encore la fumée de silice qui est la plus efficace sur ce point. L'autre principal effet de la fumée de silice sur le béton est d'affiner sa porosité, ce qui rend le béton moins sujet à la pénétration des agents agressifs en solution (Neville, 2000). La fumée de silice contribue au développement de la résistance surtout entre 3 à 28 jours, la résistance en compression à 28 jours est plus grande que celle à 180 jours (Figure 1.16) (Duval et Kadri, 1998 ; Kosmatka et al., 2004).

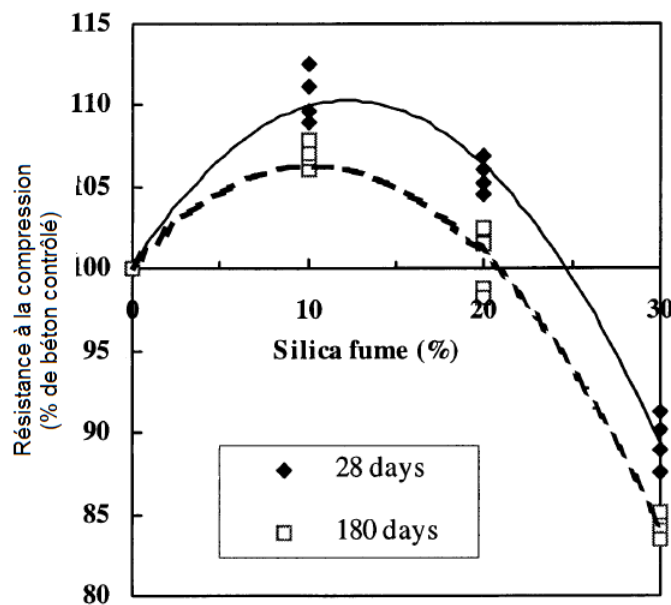


Figure 1.16 : Effet de la fumée de silice sur la résistance en compression (Duval et Kadri, 1998).

1.3.2 Facteurs externes

En plus des conditions internes qui peuvent influencer facilement les propriétés des bétons selon leurs natures ou les dosages, le béton est sensible aux conditions externes : les impacts climatiques ; la procédure de malaxage et le transport avant mise en œuvre, sont présentés dans les paragraphes suivants.

1.3.2.1 Impacts climatiques

Il arrive que l'ambiance externe du chantier (qu'il fasse chaud ou froid, qu'il vente ou non, que l'air soit sec ou humide, etc.) soit très différente des conditions usuelles de conservation ou d'essais en laboratoire lorsque l'on avait spécifié, calculé et sélectionné les caractéristiques du béton. Des nombreuses études (Ahmad et Azhar, 2004 ; Choi et al., 2011 ; Ortiz et al., 2005 ; Mauricio ruiz et al., 2001 ; Schindler et al., 2004 ; Shoukry et al., 2011) ont été réalisées sur les échanges entre l'environnement (température, humidité, vent, etc.) et le béton. Par exemple, l'Administration Fédérale des Autoroutes, depuis 1990, s'attache aux contrôles de la température du béton et un logiciel HIPERPAV a été développé pour prédire l'évolution de la température de revêtement au jeune âge selon la conduction, la convection, l'adsorption solaire et l'irradiation (Mauricio ruiz et al., 2001 ; Schindler et al., 2004). L'Université de Catalonia (Ortiz et al., 2005) en Espagne fabrique le béton à différents moments de la journée par temps chaud et froid. Ils ont relevé que la meilleure performance mécanique du béton se trouve quand le différentiel de température est faible donc, à la fin de la journée par temps chaud et au début de la journée par temps froid.

L'évaluation de la température du béton est déterminée par l'équilibre entre la génération de chaleur dégagée dans le béton et l'échange de chaleur avec l'environnement. La chaleur peut être transférée par différents mécanismes comme la conduction, la convection, le rayonnement et l'adsorption de la chaleur issue du soleil (Mauricio ruiz et al., 2001), montrés dans le Figure 1.17. La conduction existe entre les différentes couches de béton coulé, le terrain ou la surface de protection du béton. La convection est un transfert de chaleur par mouvement de fluide (eau, air), elle est en lien avec la force du vent et l'humidité relative. La chaleur approchée par le soleil est fonction de la couverture nuageuse et le rayonnement est lié à la couleur du béton. L'Administration Fédérale des Autoroutes aux E.U donne une estimation de la température de revêtement de chaussure en

béton au jeune âge influencée par l'environnement par ces quatre mécanismes (la conduction, la convection, le rayonnement et l'adsorption de la chaleur issus du soleil).

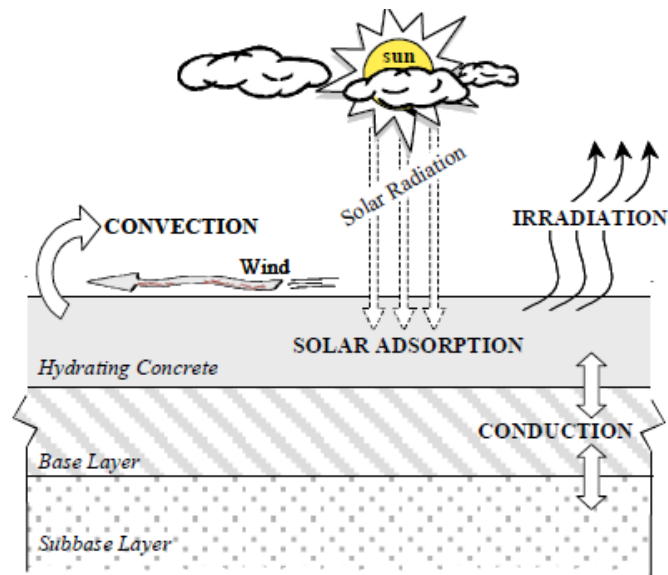


Figure 1.17 : Différents mécanismes de la chaleur transférée entre le béton et l'environnement (Mauricio ruiz et al., 2001)

Le Tableau 1.1 présente les plages de température du béton lors de sa mise en place, demandées par la norme CSA A23.1. Cette norme exige une température de béton, lors de sa mise en place, comprise entre 5°C et 35°C, selon la dimension de l'élément. Par temps chaud ou temps froid, la température du béton est généralement plus élevée ou plus faible que la température idéale. Plusieurs spécifications exigent seulement que, lors de la mise en place, la température de béton soit intérieur des limites. Pour contrer les effets d'une température élevée du béton, des précautions particulières doivent être appliquée. La méthode habituelle de refroidissement du béton consiste à refroidir les ingrédients avant le malaxage. L'Association National de Béton Prêt à l'Emploi, en 1962, a publié une équation (Équation 1.1) pour calculer la température de béton à partir de la température de ses divers ingrédients. Selon cette équation, la diminution de la température de granulat est plus efficace que celle de l'eau, car les granulats représentent de 70 à 85 % de la masse totale du béton. La glace peut être aussi utilisée afin de refroidir le béton, à condition que la glace ait complètement fondu avant la fin du malaxage. La glace ne doit pas remplacer plus de 75 % de l'eau de gâchage.

Équation 1.1:
$$T = \frac{0,22*(T_gM_g+T_lM_l)+T_eM_e+T_{eg}M_{eg}}{0,22*(M_g+M_l)+M_e+M_{eg}}$$

Où T : Température en degrés Celsius.

M : Masse en kilogramme.

g, l, e et eg : Granulats, liant, eau de gâchage et d'humidité contenue dans les granulats.

Tableau 1.1: Températures limites des bétons lors de leur mise en place (CSA A23.1)

épaisseur de la section (m)	Température (°C)	
	minimum	maximum
moins de 0.3	10	35
0.3--1	10	30
1--2	5	25
plus de 2	5	20

En plus de la température, l'humidité relative (HR) du béton est également influencée par l'environnement. Elle varie de manière significative en fonction de la profondeur, et la variation d'humidité relative est plus grande à proximité de la surface que dans le centre du béton. Ce changement d'HR peut provoquer une plus grande contrainte de traction à la proximité de la surface, ce qui pourrait entraîner un problème de fissuration. (Choi et al., 2011).

1.3.2.2 Procédure de malaxage

Le malaxage du béton est une procédure très compliquée qui est influencé par le type de malaxeur et l'énergie consommée pendant le malaxage. Il compte certains paramètres : le temps de malaxage, la vitesse de rotation de la cuve (vitesse de malaxage) et l'ordre d'introduction des composants. Le malaxage est dit efficace s'il distribue de façon homogène, et le plus rapidement possible, tous les constituants au sein du malaxeur (Ferraris, 2001). Cette homogénéité peut être caractérisée de façon directe ou indirecte. La stabilisation du signal (obtention d'un palier) indique que le mélange n'évolue plus, et qu'il est donc plus ou moins homogène (Ferraris, 2001). Le temps d'obtention de ce palier est le temps de malaxage qui est lié à la vitesse d'homogénéisation du mélange lui-même. L'énergie nécessaire pour un mélange homogène est déterminée par l'énergie consommée par les vitesses de rotation de la cuve et le temps de rotation (Orban et al., 1986). Cette énergie est également un bon indice pour montrer l'efficacité de malaxeur. La vitesse de malaxage est généralement de l'ordre de 20 à 30 tr/min, diminue avec le diamètre de la cuve. Mais elle ne dépasse pas 20 tr/min pour les bétonnières. Tous les tours de rotation supplémentaires après malaxage s'appellent l'agitation. L'agitation du béton après fabrication et avant sa mise en place est nécessaire afin de garder l'homogénéité et éviter la perte de maniabilité par le phénomène de thixotropie. L'ordre d'introduction des adjuvants influence significativement la fluidité et la stabilité de béton. Par exemple, le délai d'introduction du SP provoque une meilleure dispersion des grains de ciment, donc améliore la fluidité du béton. Dehn en Allemagne (Dehn, n.d.) a trouvé que les propriétés du béton frais sont liées aux facteurs mentionnés auparavant, c'est à dire l'énergie, l'ordre et la durée de malaxage (Figure 1.18). Les propriétés du béton durci comme la résistance à la compression peut ainsi varier par les différentes procédures de malaxage. La Figure 1.19 montre que la résistance à la compression augmente linéairement mais la fluidité du béton diminue avec le prolongement du temps de malaxage (Kırca et al., 2002 ; Erdoğan, 2005). Les effets du système de malaxage sont contraires sur les propriétés d'écoulement et sur la résistance à la compression d'une part, et sur la ségrégation d'autre part. Par exemple, un temps de malaxage élevé peut causer la ségrégation. L'introduction du SP après le VEA dans le béton améliore la fluidité mais diminue la stabilité, ce qui cause le risque de ségrégation.

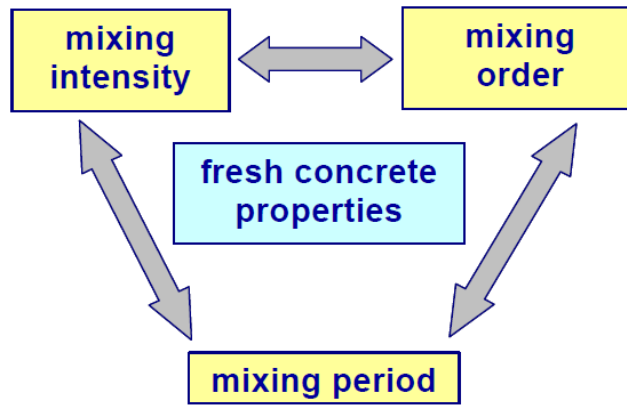


Figure 1.18 : Facteurs de malaxage qui influencent les propriétés du béton frais (Dehn, n.d.)

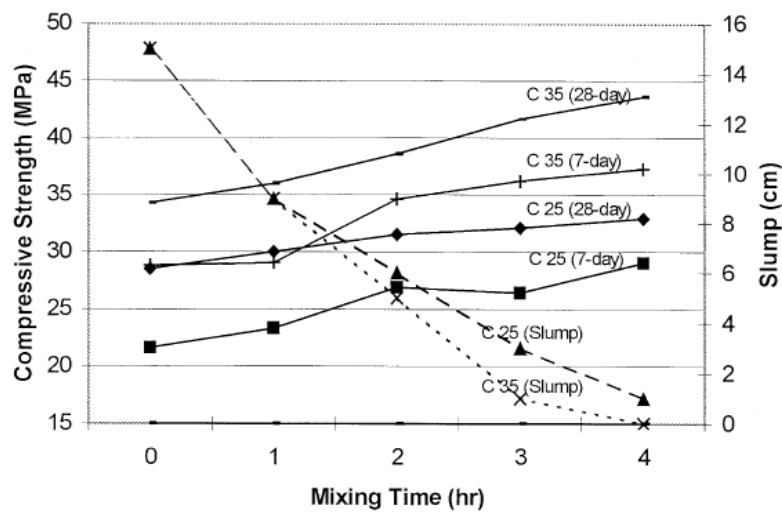


Figure 1.19 : Variation de l'étalement et de la résistance en compression en fonction du temps de malaxage (Kirca et al., 2002)

Le choix de la procédure du malaxage dépend souvent de l'application et de l'environnement. Pour le béton conventionnel, le temps de malaxage est prévu par la norme ASTM C192. Pour les bétons fortement adjuvés comme le BAP, le temps de malaxage est choisi en fonction du temps de stabilisation du béton. Celui-ci est souvent long, ce qui diminue la productivité et augmente les coûts de production (Chopin, 2003; Cazaciu et Dauvergne, 2002). Par temps chaud, afin d'éliminer l'effet de la température, il faut absolument éviter de trop prolonger le malaxage du béton, ainsi que son agitation durant le transport s'il se produit un prolongement quelconque, on augmente la quantité de chaleur dégagée. Cette dernière provoque une augmentation de la température qui cause la perte de la fluidité et l'accélération de durcissement du BAP.

1.3.2.3 Transport

Le transport du béton frais jusqu'au lieu de coulage fait appel à des matériels très différents, selon qu'il s'agit de parcourir de courtes distances sur un chantier ou qu'il doit être acheminé par camion toupie depuis une centrale de fabrication. Il y a trois éventualités envisagées durant la transport avant la mise en place qui pourraient affecter sérieusement la qualité de l'ouvrage fini (Kosmatka et al., 2004): Le délai, le raidissement et la ségrégation.

a) Délai

La durée du transport est limitée en fonction des conditions ambiantes de température, d'hygrométrie ou de vent. La norme ASTM C94 limite à 120 minutes le temps qui doit s'écouler entre le gâchage et le déchargement complet du béton sur chantier. Par temps chaud, ce temps peut raisonnablement être réduit à une heure ou 45 minutes. Donc le transport et la mise en place du béton doivent être exécutés aussi rapidement que possible, car tout retard se traduit par une perte d'affaissement et une augmentation de la température du béton. Par contre, pour un béton avec l'emploi de retardateurs de prise et de plastifiants ou un BAP qui est très adjuvanté, la baisse de maniabilité peut être résolue.

b) Raidissement

Le béton conventionnel commence à raidir dès le contact eau-ciment, mais le raidissement qui se produit dans les 30 premières minutes ne pose ordinairement pas de problème : le béton agité de façon continue peut généralement être mis en place et consolidé dans les deux heures qui suivent son malaxage. La planification doit éliminer ou réduire au maximum toute variable susceptible de permettre au béton de raidir au point d'empêcher sa pleine consolidation ou compliquer sa finition.

c) Ségrégation

Pour le BAP, la fluidité et la stabilité du béton sont très importantes. L'agitation (rotation de la toupie) pendant la durée du transport est utilisée pour éviter la floculation des grains de ciment et garder l'homogénéité du béton. La vitesse d'agitation correspond généralement à une vitesse de 2 à 6 tr/min et la vitesse de malaxage à 6 à 18 tr/min (Kosmatka et al., 2004).

1.4 Effets des facteurs externes sur les propriétés du béton

De nombreux facteurs internes ou externes qui peuvent influencer les propriétés du béton. Un intérêt particulier pour cette thèse est porté sur les effets de deux facteurs externes (la température et l'agitation) sur la rhéologie et l'évolution du béton, la vitesse de prise, la cinétique d'hydratation, la mécanique du béton.

1.4.1 Effet de la température

Les impacts climatiques sont les facteurs externes qui peuvent influencer les propriétés du béton. Les effets de l'évolution de la température du béton sur l'efficacité du SP, l'hydratation du ciment, les propriétés rhéologiques, la teneur en air et la durabilité des BAP, sont présentés dans les paragraphes suivants.

1.4.1.1 Efficacité du superplastifiant

La variation de la température du béton peut influencer l'adsorption de SP sur les grains de ciment (Yamada et al., 1999 ; Hanehara et Yamada, 2008). La Figure 1.20 montre que l'adsorption de PC est plus petite à température faible qu'à température élevée. L'Université du Nevada a étudié l'influence de la température (de - 0.5°C à 50°C) sur l'adsorption de PC. Il y a très peu d'effet de la température sur la concentration de PC libre dans le BAP entre 14 et 36°C, mais cette concentration diminue au-delà de cet intervalle (Figure 1.21). La concentration de PC libre dans le mélange ne représente pas l'adsorption de PC sur les hydrates, mais l'augmentation de cette concentration libre peut conduire à l'augmentation de l'adsorption (Ghafoori et Diawara, 2010).

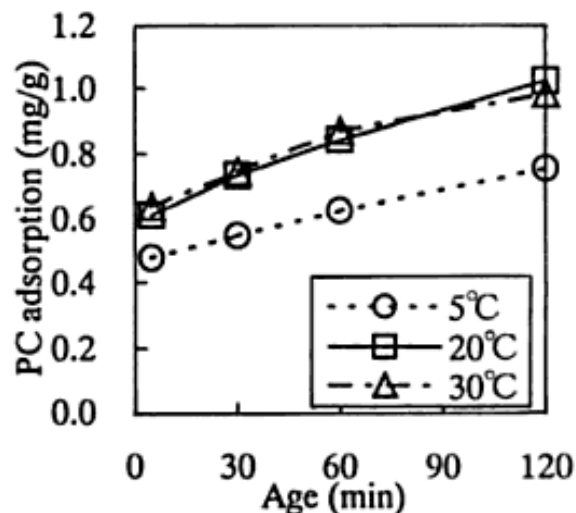


Figure 1.20 : Adsorption de PC à différentes températures (Yamada et al., 1999)

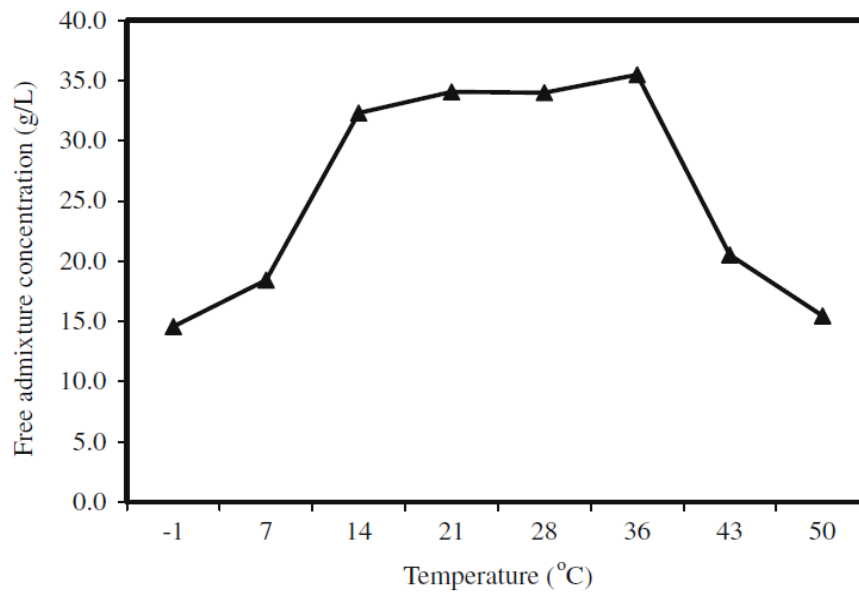


Figure 1.21 : Influence de la température sur la concentration en PC libre dans le BAP (Ghafoori et Diawara, 2010)

L'efficacité du SP est liée à l'adsorption de SP sur les grains de ciment, alors la température a un effet significatif sur cette efficacité et donc influence les propriétés des bétons avec superplastifiant. La fluidité dépendant de la température du mélange cimentaire peut être très variable (Figure 1.22). Cette variation peut s'expliquer par le paramètre Ad/SSA qui a été présenté dans le paragraphe précédent sur la Figure 1.13. Quelques superplastifiants sont très sensibles à l'évolution de la température, par exemple, Adjoudj (Adjoudj et Ezziane, 2010) a trouvé un type de SP qui a un effet néfaste sur la perte de fluidité (Figure 1.23). La différence de la fluidité entre 5 et 60 minutes d'où les valeurs importantes témoignent de l'inefficacité de ce produit sous des températures élevées et même au-dessus de 25°C.

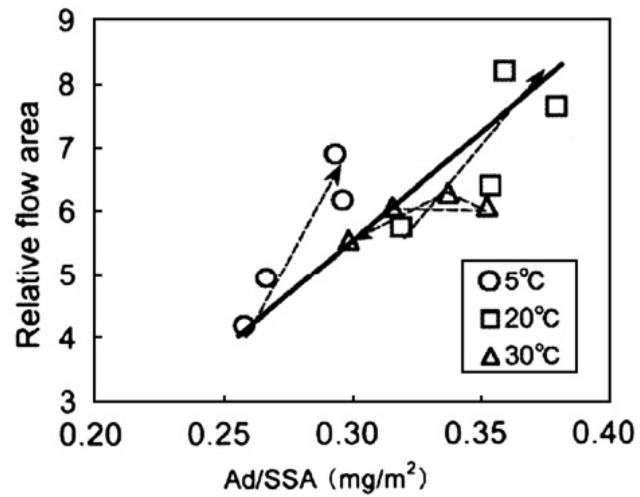


Figure 1.22 : Fluidité de pâte et l'adsorption de PC par surface spécifique de grain de ciment à la température de 5, 20 et 30°C (Yamada et Hanehara, 2001)

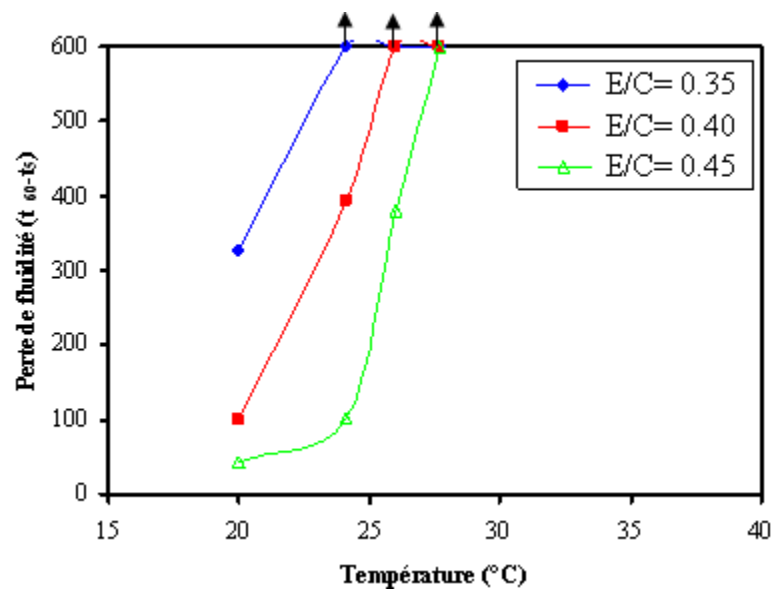


Figure 1.23 : Perte de fluidité (t60-t5) en fonction de la température (Adjoudj et Ezziiane, 2010)

1.4.1.2 Hydratation

Les conditions climatiques au cours du processus de durcissement du béton jouent un rôle important pour l'hydratation. La température joue un rôle important dans la vitesse du processus d'hydratation. En cinétique chimique, la loi d'Arrhenius (Arrhenius, 1889) permet de décrire la variation de la vitesse d'une réaction chimique en fonction de la température (Équation 1.2). D'après de nombreuses recherches, la loi d'Arrhenius peut décrire également l'influence de la température sur la vitesse de la réaction d'hydratation du ciment (Byfors, 1980 ; Kouakou et al., 1996). Elle décrit convenablement cette variation :

$$\text{Équation 1.2 : } k = A e^{-E_a/RT}$$

Où : k = Coefficient de vitesse de réaction chimique.

A = Constante caractéristique du matériau.

E_a = Eergie d'activation apparente (J/mol).

R = Constante des gaz parfaits (J/K.mol).

T = Température absolue du matériau en Kelvin.

La loi d'Arrhenius exprime la vitesse d'hydratation qui est liée directement à la température de mélange et à la quantité de chaleur dégagée par le mélange pendant l'hydratation. De nombreuses études ont été menées afin d'élucider l'influence de la température sur les différents mécanismes impliqués durant l'hydratation (Goto et Roy, 1981 ; Kjellsen et Detwiler, 1992 ; Wang et al., 2004). À température faible, l'hydratation du ciment est lente et il y a une diminution de la concentration en ions sulfates faible dans la solution. Au contraire, à température élevée, il y a une accélération de l'hydratation et il y a une concentration en ions sulfates dans le béton diminue rapidement. Lafarge a étudié l'effet de la température (de 20°C à 60°C) sur l'hydratation des différents types de ciment Portland, avec différents E/C et différentes finesses de grain de ciment. Il a trouvé que la réaction d'hydratation est toujours plus rapide lorsque la température est plus élevée (Kim et al., 2002; Lin et Meyer, 2009 ; Termkhajornkit et Barbarulo, 2012).

La Figure 1.24 montre que l'augmentation de la température accélère la vitesse d'hydratation et la température élevée (jusqu'à 60°C) ne limite pas le degré d'hydratation. Une augmentation de la température engendre une accélération de la cinétique d'hydratation, dont les conséquences sont une accélération de la formation d'ettringite et donc une rigidification de la suspension par accroissement de la concentration en solides (Figure 1.25) (Yamada et al., 1999). L'effet de la température sur un liant CKD+FA (poussière de four à ciment et cendres volantes) est plus important que celui sur le ciment Portland (Wang et al., 2004). Une température élevée induit d'une hydratation plus rapide mais favorise le développement d'un réseau poreux plus grossier (Barbarulo, 2002 ; Gallucci et al., 2006 ; Lothenbach et al., 2007). Une élévation de température durant les premiers stades de l'hydratation augmente le développement de la résistance mais a des conséquences néfastes sur les propriétés à long terme (Wang et Lee, 2012; Kim et al., 2002). Il est important de contrôler la température ambiante et la température du béton à court terme car une mauvaise réaction d'hydratation de la surface du produit en béton peut entraîner une augmentation de la porosité, conduisant éventuellement à l'efflorescence primaire et à un produit affaibli. Sur le long terme, la résistance des bétons dont la cure a été conduite à basse température est largement supérieure à ceux dont la cure a eu lieu à plus haute température sans pour autant que leur hydratation soit plus élevée. Ceci est dû à un développement microstructural plus grossier, les hydrates (notamment le C-S-H) étant plus denses à haute température et distribués de manière plus hétérogène, permettant ainsi le développement d'un réseau poreux plus large, à l'origine de la perte de résistance.

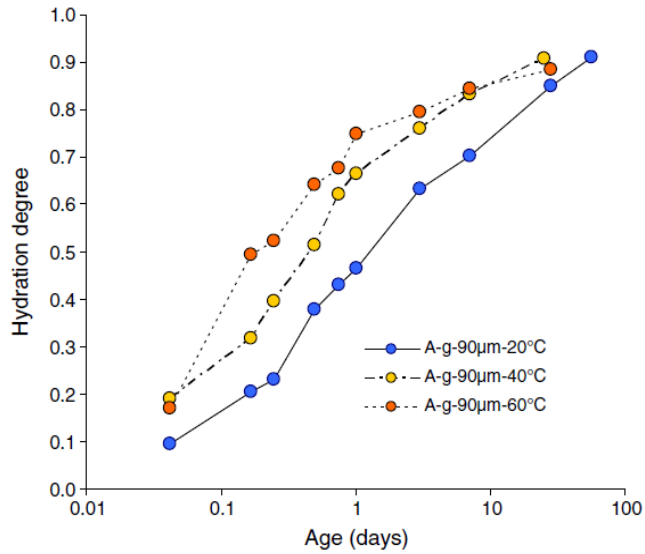


Figure 1.24 : Degré d'hydratation en fonction de la température et l'âge du béton (Termkhajornkit et Barbarulo, 2012)

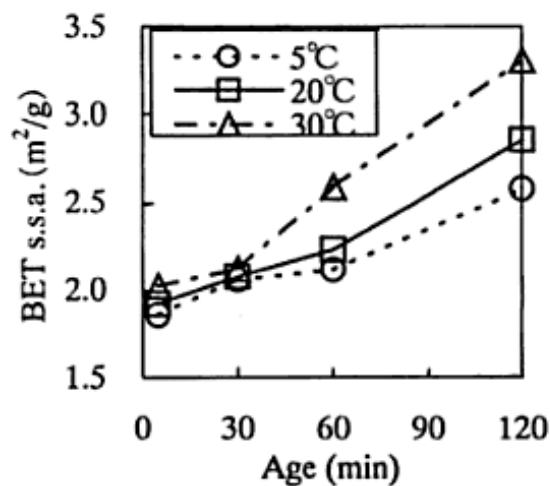


Figure 1.25 : Surface spécifique des hydrates en fonction de la température et l'âge du béton (Yamada et al., 1999)

La Figure 1.26 montre que l'augmentation de la température de béton ou MBE accélère le dégagement de la chaleur. L'hydratation de l'aluminate tricalcique contenu dans le ciment Portland engendre une quantité de chaleur considérable (réaction exothermique); dans la plupart des pièces de béton, l'augmentation correspondante de température est faible, la chaleur se dissipant rapidement par les surfaces découvertes. Elle peut être avantageuse si elle est modérée, car elle accélère l'hydratation et, lorsqu'on procède par temps froid à des travaux de bétonnage, elle maintient des températures raisonnables qui permettent l'hydratation. Dans le cas des pièces massives de béton, par contre, le rapport de

la surface au volume est moindre ; la dissipation de chaleur est retardée de sorte que des températures internes excessives peuvent prendre naissance. Il peut en résulter des hausses rapides de température qui engendrent des craquelures dans le béton. En vue d'éviter les difficultés, il est en général recommandé que les températures régnant à l'intérieur de la masse ne doivent pas augmenter de plus de 11 à 14°C au-dessus de la température annuelle moyenne ambiante (ACI 308) (Kosmatka et al., 2004).

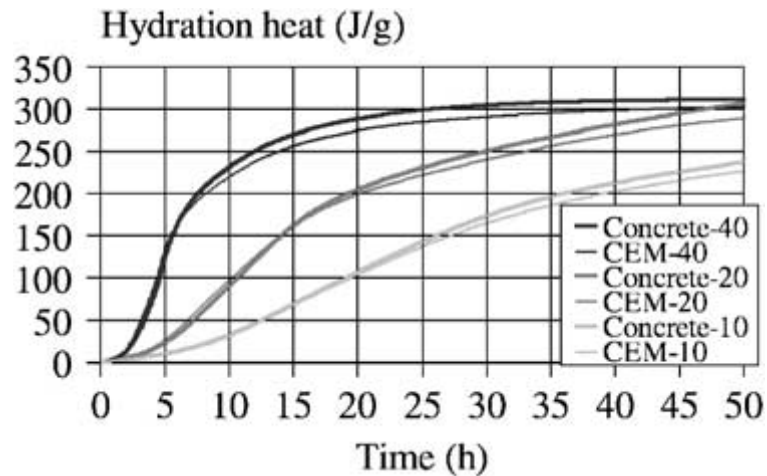


Figure 1.26 : Influence de la température de béton sur le dégagement de la chaleur (Wirquin et al., 2008)

1.4.1.3 Rhéologie

La variation d'adsorption de SP causée par le changement de la température, doit par conséquence influencer l'efficacité de l'adjuvant et faire varier les propriétés du béton frais : rhéologie initiale et son évolution dans le temps, thixotropie, rétention de maniabilité, etc. Quand la température est élevée, le seuil et la thixotropie augmente et la viscosité diminue (Assaad et al., 2003 ; Petit et al., 2007; Nehdi et Martini, 2007 ; Fernández-Altable et Casanova, 2006; Ovarlez et Coussot, 2007 ; Helnan-Moussa, 2009)

À basse température, la diminution des valeurs du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique est essentiellement due à la baisse de la tension de surface des ménisques d'eau entre les constituants solides (Li et al., 2004). Ce phénomène est accru par l'adsorption des éventuels adjuvants réducteurs d'eau sur les sites réactifs des grains de ciment. Toutefois, la baisse de la capacité d'adsorption du superplastifiant avec la baisse de la température du mélange peut engendrer une augmentation de la viscosité plastique. Petit, dans la Figure 1.27, trouve que le taux d'augmentation du seuil de cisaillement est plus élevé à haute température dans le temps. Mais avec la normalisation du temps de prise initial du BAP, les valeurs de seuil de cisaillement sont indépendantes de la température. Pour la viscosité du BAP (Figure 1.28), l'effet de la température est plus compliqué. Pour la viscosité du BAP (Figure 1.28), l'effet de la température est plus compliqué. Jolicoeur (Jolicoeur et al., 1997) a montré que la viscosité plastique diminuait avec la température. Mais Petit (Petit et al., 2007) a trouvé que la viscosité plastique de BAP à 30°C était plus petite que celle à 20°C dans le temps pour quelques résultats obtenus. Avec le temps normalisé, l'effet de la température sur la viscosité plastique est encore très significatif, plus la température augmente, plus la viscosité plastique augmente. Les études de la température sur les propriétés rhéologiques de BAP sont limitées. Le BAP est étudié jusqu'à la prise initiale du béton, l'effet de la température était plus clair dans la dernière période. Par contre, au début, quand le béton est encore très frais, l'influence de la température n'est pas très claire.

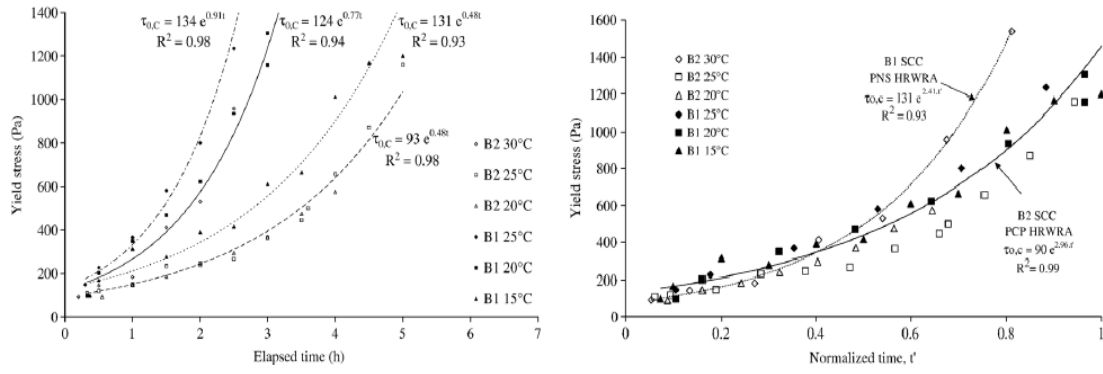


Figure 1.27 : Seuil de cisaillement en fonction de la température et du temps
(Petit et al., 2007)

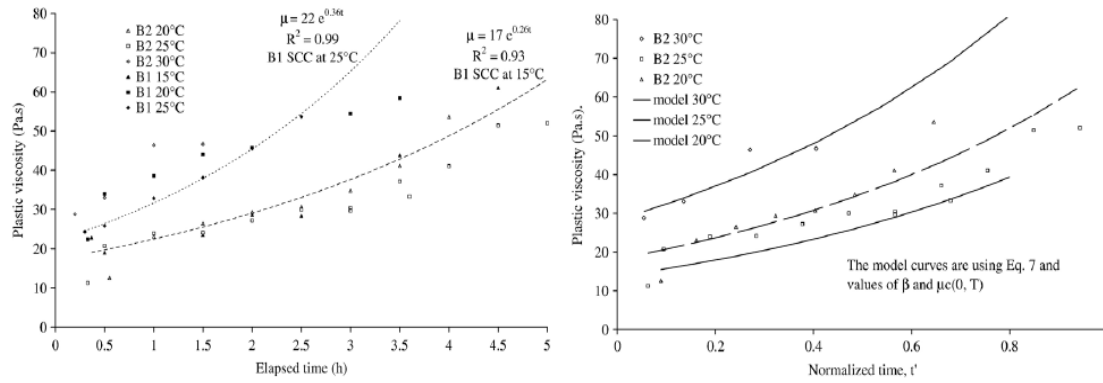


Figure 1.28 : Viscosité plastique en fonction de la température et le temps
(Petit et al., 2007)

En utilisant le temps normalisé t' qui est défini comme le rapport du temps écoulé (t) sur le temps de fin de période latente (t_f), le seuil $\tau_{o,m}(0, T)$ ou la viscosité initiale $\mu_{o,m}(0, T)$ de micro-mortiers à la température d'essai, le seuil $\tau_{o,b}(t')$ ou la viscosité $\mu_{o,b}(t')$ de béton peuvent s'exprimer par les équations suivantes :

Équation 1.3 : $\tau_{o,b}(t') = \tau_{o,m}(0, T) \cdot \left[\sum_{i=1}^n (g - h \cdot \log(d_i)) \cdot K_i \right] \cdot \exp^{-at'}$

Équation 1.4 : $\mu_b(t') = \mu_m(0, T) \cdot (1 - V/C)^{-(a.f+b)} \exp^{-bt'}$

Avec : n est l'indice maximal de la classe granulaire pour les bétons, p celui des micromortiers, d_i est la grosseur moyenne de chaque fraction granulaire considérée (les mailles des tamis normalisés, en mm), K_i la contribution de la fraction i à l'indice de compaction du mélange, g , h , et a des constantes expérimentales, V la concentration volumique des granulats d'ajout, C le rapport volumique de solides et f le module de finesse des granulats d'ajout. Enfin, a et b sont des constantes expérimentales (Petit et al., 2007).

Jolicoeur et Nawa (Jolicoeur et al., 1997 ; Nawa et al., 2000) ont observé que la fluidité de différents ciments suit un comportement non linéaire avec l'augmentation de la température du mortier. Nehdi (Nehdi et Al Martini, 2009) ont mesuré le seuil de cisaillement de pâtes de ciment dans le temps à différentes températures avec l'aide de la rhéologie oscillatoire et l'analyse d'algorithme génétique. Helnan-Moussa (Helnan-Moussa, 2009) a étudié l'effet de la température sur la viscosité et la thixotropie du BAP à étalement initial constant (650 ± 10 mm). Quel que soit le dosage en VEA, la viscosité plastique et l'indice de thixotropie diminue entre 11,3 et 24°C et augmente entre 24 et 30,7°C. Un minimum de viscosité et de l'indice de thixotropie apparaît à 24°C (Figure 1.29). Quand la température augmente, l'adsorption de superplastifiant sur les sites réactifs augmente. En s'absorbant sur les grains solides, le superplastifiant chargé négativement accroît le potentiel de surface, ce qui conduit à une meilleure dispersion des grains. La diminution des forces interparticulaires, liée à une augmentation de la distance entre particules, diminue la viscosité plastique et nécessite une force de déstructuration moins importante qui induit à une diminution de l'indice de thixotropie. Par contre, pour des températures supérieures à 24°C, la quantité de superplastifiant pour obtenir un même étalement est fortement réduite, la dissolution des ions est accélérée, la concentration des ions augmente, le milieu est encombré. La compression de la double couche ajoutée à l'augmentation du mouvement brownien augmente les forces de coagulation et de collisions interparticulaires. La viscosité et l'indice de thixotropie augmente (Helnan-Moussa, 2009).

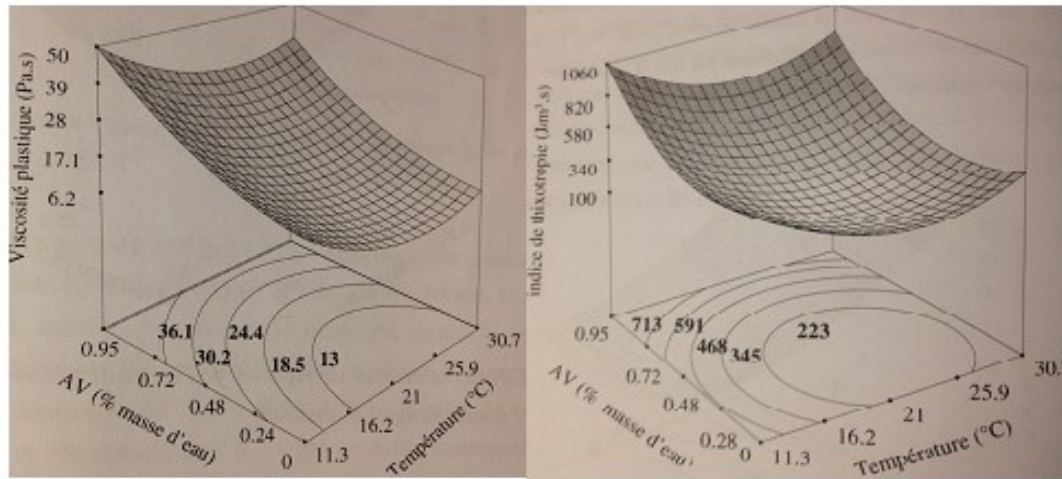


Figure 1.29 : Surfaces et courbes iso-réponses de viscosité plastique (gauche) et d'indice de thixotropie (droite) en fonction de la température et du dosage en agent de viscosité (Helnan-Moussa, 2009)

Des études se sont intéressées à la solidification progressive des pâtes de ciment, à travers la mesure de l'évolution au cours du temps de leur module élastique (en première approximation relié au seuil de contrainte par une relation de proportionnalité) (Roussel, 2007). Typiquement, il y a un module élastique qui augmente au cours du temps de manière très significative (Figure 1.30), ce qui fournit une information précise sur les effets mécaniques de la restructuration au cours du temps due à la thixotropie. Une étude sur de nombreuses formulations à diverses températures d'étude et constaté que les évolutions des modules élastiques au cours du temps des diverses formulations étudiées sont analogues. Les courbes correspondantes s'expriment uniquement en fonction du temps divisé par un temps caractéristique θ qui reflète la vitesse de restructuration du matériau.

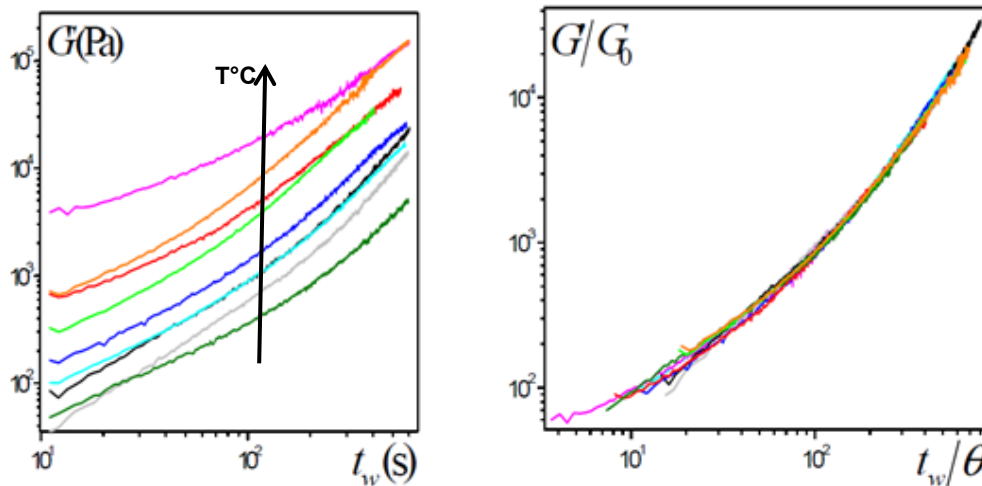


Figure 1.30 : (Gauche) Module élastique G' en fonction du temps de repos t_w pour une pâte de ciment à différentes températures et différentes proportions de nanosilice et de superplastifiants. (Droite) Module élastique G divisé par le module de référence G_0 en fonction du temps divisé par le temps caractéristique (Ovarlez et Coussot, 2007)

1.4.1.4 Teneur en air

L'utilisation d'air entraîné est fortement recommandée lors du bétonnage par temps froid afin d'améliorer la résistance au gel/dégel. Les températures chaudes peuvent aussi influencer l'entraînement d'air. Quatre mécanismes sont proposés par l'université de Texas (Du et Folliard, 2005) pour expliquer l'effet de la température :

- La viscosité élevée du béton entraîne une teneur en air faible. La viscosité de la pâte peut être considérée comme la barrière d'énergie pour les formations de bulles d'air. Généralement la température élevée cause une viscosité plastique élevée (présenté dans les paragraphes précédents).
- Les cations polyvalents (Ca^{2+} et Al^{3+}) existent dans la solution et changent la propriété moussante d'AEA. Par exemple, le Ca^{2+} avec l'AEA forme des calciums insolubles qui aident à la stabilité de l'air dans le mélange. Avec l'augmentation de la température, la vitesse de la création de cette partie insoluble et la précipitation sont élevées, il y a donc moins de cations polyvalents qui aident à la stabilité de l'air dans la solution et la teneur en air diminuent.
- Les hydrates du béton adsorbent l'AEA. A température s'élevée, plus l'hydratation s'accélère, plus d'AEA est adsorbée sur les hydrates, et moins d'AEA reste dans la solution, donc la teneur en air diminue.

- La solubilité de l'air dans l'eau est réduite avec l'augmentation de la température, car la corrélation existe entre la molécule d'air et l'évaporation d'eau. L'augmentation de la température chasse l'air dans l'eau.

Lorsqu'il fait plus chaud, il faut augmenter le dosage de l'agent entraîneur d'air pour maintenir constante la teneur en air du béton (Kosmatka et al., 2004). La Figure 1.31 montre que lorsque la température du béton augmente, la quantité d'air entraîné diminue, surtout si l'affaissement augmente (Lerch, 1960). Cet effet est particulièrement important dans le cas du bétonnage par temps chaud, lorsque la température du béton peut être relativement élevée. La diminution de la teneur en air peut être compensée par l'ajout d'AEA. L'effet de la température sur l'efficacité du moussage de différents AEA dépend de la nature de l'AEA, mais généralement il est considéré que si la solubilité de l'AEA change significativement avec la température, la capacité du moussage de l'AEA change dans le même sens que la variation de la solubilité (Myers, 1999). La température élevée réduit la stabilité de bulle d'air (Schott, 1988).

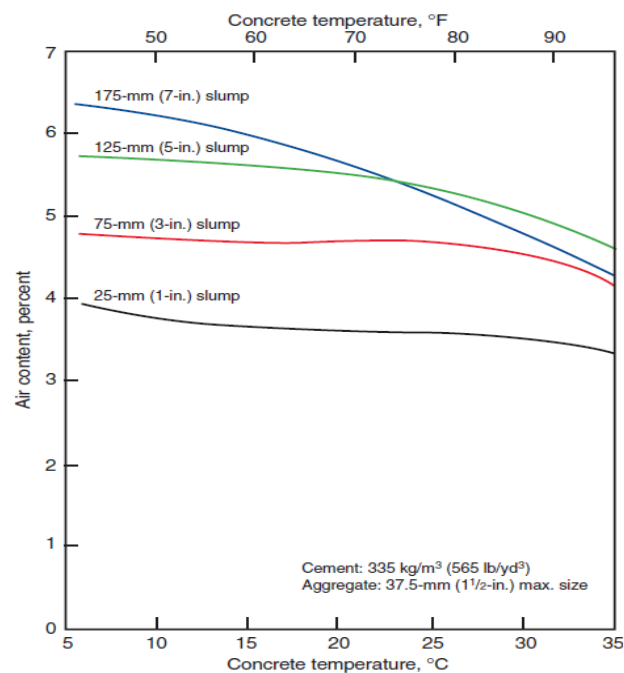


Figure 1.31 : Relation entre la température, l'affaissement et la teneur en air du béton (Lerch, 1960)

1.4.1.5 Résistance en compression

La température influence la vitesse d'hydratation du ciment, par conséquent change le durcissement et les gains de résistance du béton.

De nombreuses recherches s'accordent à dire que la température élevée cause l'augmentation de la résistance en compression initiale des mortiers ou bétons (Gaynor et al., 1985 ; Lothenbach et al., 2007 ; Gallucci et al., 2006) (Figure 1.32). Les principaux avantages de ces mélanges coulés par temps chaud sont obtenus durant les premiers jours. Au contraire, pour les mortiers ou les bétons coulés par temps froid, les avantages sont plus prononcés et persistent plus longtemps qu'à des températures élevées (Lothenbach et al., 2007). Une élévation de température durant les premiers stades de l'hydratation augmente le développement de la résistance mais a des conséquences néfastes sur les propriétés à long terme. Par temps chaud, l'élévation de température du béton ajoutée à la chaleur d'hydratation du ciment peut conduire à une dessiccation importante et à des gradients thermiques susceptibles de provoquer des fissures. Une température du béton de 38°C durant les 24 premières heures peut faire en sorte que la résistance en compression à 28 jours soit de 10 % à 15 % plus faible que la résistance en compression d'un béton à température normale et suivant un murissement par la norme ASTM C31 (Gaynor et al., 1985).

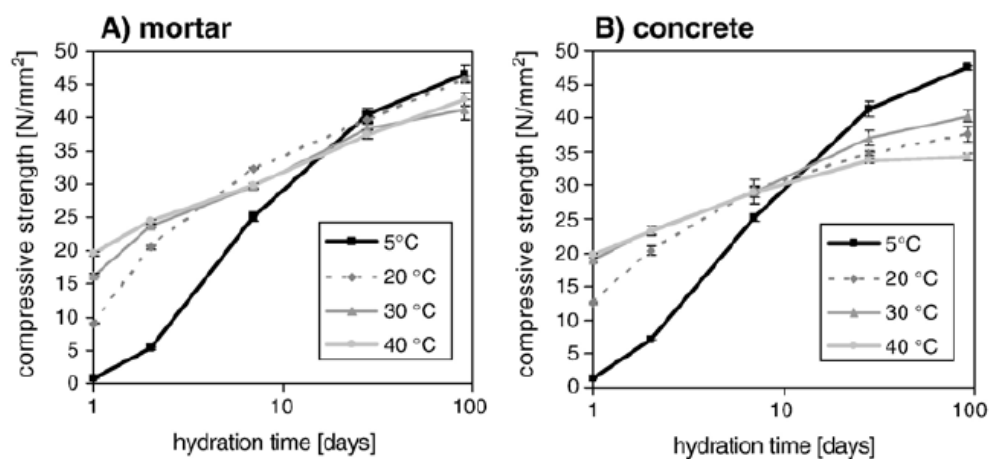


Figure 1.32 : Variation de la résistance en compression du mortier (a) et du béton (b) (Lothenbach et al., 2007)

1.4.1.6 Précautions :

Par temps chaud, l'élévation de la température ambiante, combinée à celle du mortier ou du béton et ajoutée à la chaleur dégagée lors de l'hydratation du ciment, peut conduire à une évaporation intense provoquant des chutes de résistance et de la fissuration.

Les précautions à prendre sont (Lafarge, 2014):

- employer un adjuvant retardateur de prise ;
- limiter la température du béton ou du mortier frais ;
- choisir de préférence un ciment 32,5 ou à faible résistance initiale ;
- refroidir l'eau de gâchage ;
- curer le béton ou le mortier frais pour le protéger de la dessiccation ;
- exécuter les coulages en fin de journée ;
- bien humidifier les matériaux et/ou supports.

Par temps froid, la prise peut être retardée, ce qui ralentit l'évolution des réactions d'hydratation et, lorsque la température baisse en dessous de 0 °C, peut entraîner le gel du béton ou du mortier. Les précautions à prendre sont (Lafarge, 2014):

- choisir un ciment 52,5 de préférence à un 32,5 ;
- doser l'eau aussi faiblement que possible ;
- chauffer le béton ou le mortier (chauffage de l'eau ou des granulats) ;
- employer un adjuvant accélérateur de prise ;
- protéger la surface des ouvrages après réalisation ;
- exécuter les coulages en fin de matinée ;
- veiller aux gelées nocturnes ;
- différer le décoffrage pour éviter tout arrachement du parement.

1.4.2 Effet du malaxage et de l'agitation avant mise en place

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Après fabrication du béton, l'agitation durant le transport et un nouveau malaxage sur le site de construction avant de couler le béton sont importantes afin d'avoir une bonne qualité du béton. Le béton est un matériau hétérogène par nature. Lors de son malaxage, on cherche d'une part à lui assurer une homogénéité d'ensemble, d'autre part, à obtenir un mélange ordonné (structuré) à une échelle microscopique. Pour le BAP qui est fortement adjuvanté, il est intéressant de vérifier que le temps de stabilisation est le temps optimal de malaxage, pour que les caractéristiques du béton (rhéologie, résistance...) soient suffisantes après le temps de malaxage ; les systèmes d'agitation complémentaires sont nécessaires ; le transport en toupie n'est pas un facteur de dégradation de la qualité du béton. Généralement, l'utilisation industrielle de BAP a fait apparaître des temps de malaxage plus longs pour la fabrication que pour les bétons traditionnels. De plus l'agitation pendant le transport, s'il est long, peut être problématique pour le BAP. Les effets du malaxage et de l'agitation sur les caractéristiques du béton ainsi que leurs propriétés sont, présentés dans les paragraphes suivants.

1.4.2.1 Efficacité du superplastifiant

L'énergie consommée lors du malaxage pour un mélange homogène est déterminée par les vitesses de rotation de la cuve et le temps de rotation (Orban et al., 1986). La consommation de dispersant (ou SP) peut être influencé par l'énergie consommée lors du malaxage, exprimée par le nombre de tours cumulés de malaxage (Vickers et al., 2005). Plus l'énergie consommée de malaxage est grande, plus la consommation de SP dans le béton est grande (Figure 1.33).

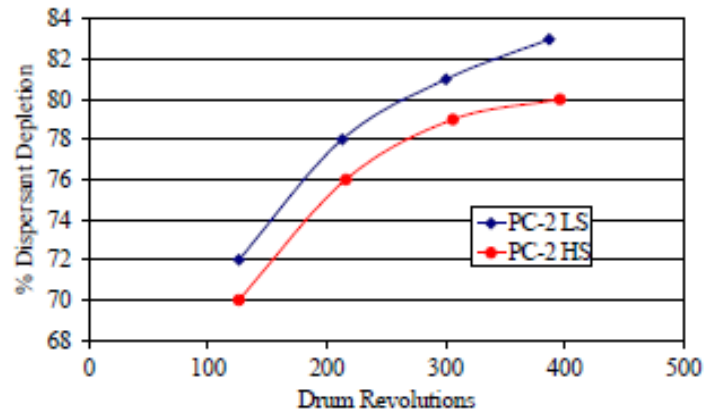


Figure 1.33 : Consommation de SP en fonction du nombre de tour de malaxage cumulé (Vickers et al., 2005)

1.4.2.2 Hydration

Le malaxage ou l'agitation influence significativement l'hydratation du ciment (Rupnow et al., 2007 ; Kırca et al., 2002 ; Kwelle et Mofunlewi, 2008). Kırca (Kırca et al., 2002) montre que l'augmentation du temps de malaxage produit une faible élévation de la température du béton (Figure 1.34).

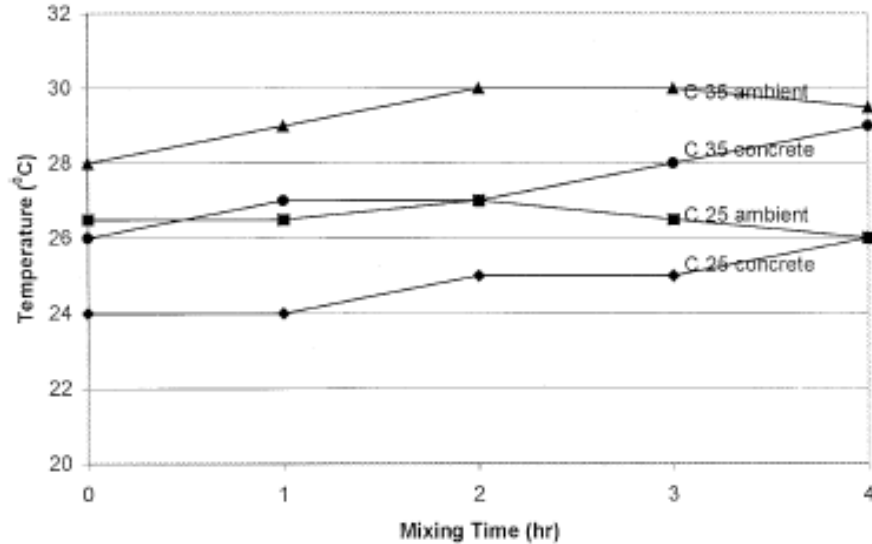


Figure 1.34 : Effet du prolongement du malaxage et de la température ambiante sur la température du béton (Kırca et al., 2002)

La vitesse de malaxage élevée accélère ainsi l'hydratation. Dans le rapport (Rupnow et al., 2007) de l'Administration Fédérale des Autoroutes (USA), la comparaison des résultats d'hydratation est faite entre deux types de malaxeur à différentes vitesses (Figure 1.35). La vitesse du malaxeur Hobart (1 = 140 tr/min et 2 = 285 tr/min) est beaucoup plus petite que celle du malaxeur Waring Blender (1= 6000 tr/min et 2 = 14000 tr/min). Cette différence de vitesse de malaxage entraîne que le degré d'hydratation de la pâte fabriquée avec le malaxeur Hobart à vitesse faible, est 6 % plus petit que celle obtenue avec le malaxeur Waring Blender à vitesse élevée. D'un point de vue pratique, l'hydratation peut avoir des conséquences macroscopiques et réversibles tant que l'énergie de malaxage est suffisante à casser les liens C-S-H entre les grains de ciment. Mais quand l'énergie de malaxage devient insuffisante pour casser les liens, l'hydratation est à l'origine de la perte de maniabilité (Roussel et al., 2012). La fausse prise consiste dans un durcissement hâtif qu'on peut vaincre au moyen d'un malaxage. Dans le cas des pâtes de ciment, si l'énergie de malaxage est suffisante pour amener le mélange à un état de référence, l'évolution du comportement du matériau qui est due à la floculation ou à l'enchevêtrement des CSH est peu importante même si, à l'échelle microscopique, il y a une réaction chimique non réversible qui crée des liens CSH entre les particules. Car ces dernières peuvent être assez faibles pour être brisées par un malaxage puissant, alors que les autres liens CSH peuvent apparaître spontanément au prochain repos (Jiang et al., 1995 ; Nonat et al., 1997). L'agitation prolongée maintenue pendant le transport garantit en effet l'obtention sur chantier d'un béton maniable.

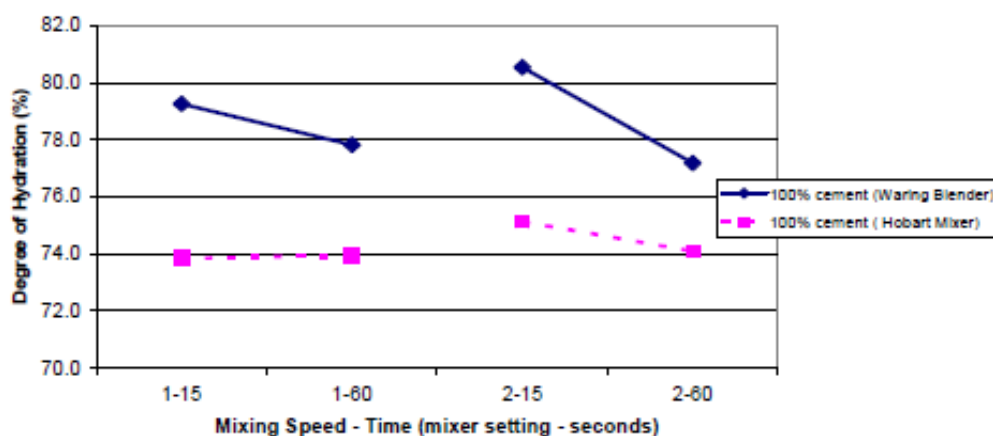


Figure 1.35 : Degré d'hydratation d'une pâte de ciment en fonction du temps et de la vitesse de malaxage (Rupnow et al., 2007)

1.4.2.3 Rhéologie

Il existe une relation claire entre la rhéologie du béton et l'énergie consommée du malaxage lors de la fabrication (Ferraris, 2001 ; Chopin, 2003 ; Rupnow et al., 2007). En étudiant la cinétique de structuration, Roussel (Roussel et al., 2012) montre qu'il existe une thixotropie à court terme en raison de la floculation de colloïdes et une thixotropie à long terme en raison de la nucléation des hydrates. Les propriétés thixotropiques de la pâte de ciment peuvent être à l'origine de deux contraintes de cisaillements critiques liées au seuil de repos, dont la grande contrainte de cisaillement critique et la petite contrainte de cisaillement critique (Figure 1.36).

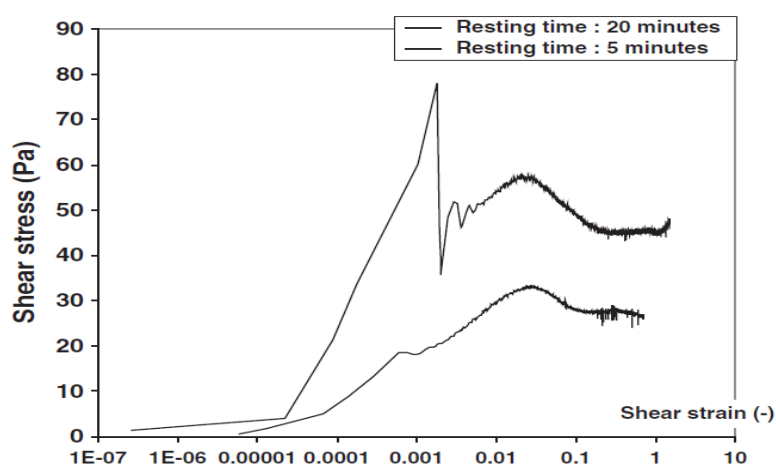


Figure 1.36 : Contrainte de cisaillement en fonction de la déformation lors d'un test Vane pour un rapport eau- ciment de 0,4 (Roussel et al., 2012)

En attribuant chacune de ces contraintes de cisaillement critiques à un phénomène spécifique physique et chimique impliqués dans le comportement de la pâte à l'état frais, Roussel trouve que la grande contrainte de cisaillement critique peut être associée au non-contact d'interactions entre les particules colloïdales de ciment (par la force Van der Waals). Le temps nécessaire pour former ce réseau est de l'ordre de quelques secondes. La floculation colloïdale affecte seulement la thixotropie sur le court terme (quelques secondes), il y aura une fausse perte de maniabilité à cause du petit retard sur l'écoulement. Après quelques secondes, le réseau colloïdal n'évolue plus (le module d'élasticité étant constant), il peut donc être conclu que le seuil de cisaillement est le résultat de la combinaison des interactions colloïdales et des enchevêtrements de CSH entre les grains de ciment formés au repos qui n'ont pas encore été brisés au moment où le seuil a été atteint ou qui ont été brisés mais qui se sont réformés. La petite contrainte de cisaillement critique

peut être associée aux hydrates liés par les CSH, qui se forment au contact de l'eau et du ciment. Ils se développent dès que les particules sont floculées pendant le malaxage. Les liaisons entre les hydrates (CSH) peuvent être réversibles si l'énergie de malaxage est suffisante. Roussel montre que l'évolution du module élastique due à la nucléation de CSH est linéaire dans le temps et le seuil de repos augmente dans le temps, c'est pourquoi la perte de maniabilité apparaît dès que l'énergie de malaxage est insuffisante pour briser ces liaisons inter-particules (Ovarlez et Coussot, 2007 ; Roussel et al., 2010), si nous négligeons ici toutes les réactions chimiques entre les HRWRA et les grains de ciment (Flatt, R. J. et Houst, Y. F., 2001). Vickers (Vickers et al., 2005) a trouvé une bonne corrélation entre l'affaissement du béton et le nombre de tour cumulé, tandis qu'une faible corrélation existe entre l'affaissement et le temps de rotation après la fabrication de béton (Figure 1.37). Le seuil de cisaillement est lié à la fluidité du mélange cimentaire. L'augmentation de l'énergie de malaxage ou de l'agitation conduit à la perte de fluidité, et le seuil de cisaillement augmente en même temps.

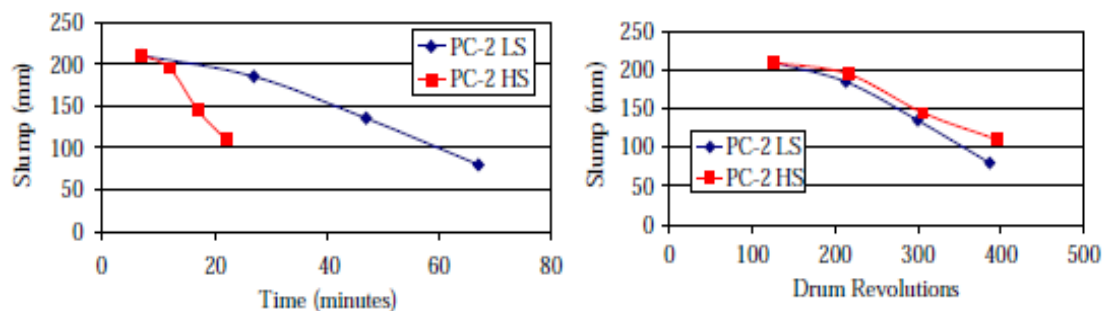


Figure 1.37 : Etalement en fonction du temps de malaxage à vitesse faible et à vitesse élevée (gauche) et l'étalement en fonction du nombre tour de malaxage cumulé (droite) (Vickers et al., 2005)

Les autres propriétés du béton frais comme la viscosité plastique et la thixotropie peuvent être influencées également par la variation du malaxage ou l'agitation. Quand la vitesse de malaxage ou le temps de malaxage augmente, l'énergie consommée augmente, la viscosité et la thixotropie diminuent (Rupnow et al., 2007). La Figure 1.38 montre que la viscosité de la pâte fabriquée à vitesse faible (dans le malaxeur Hobart) est deux fois plus grande que celle d'une pâte fabriquée à vitesse élevée (dans le malaxage Waring Blender). La pâte fabriquée à vitesse faible produit un mélange moins fluide, et un phénomène de thixotropie plus significatif indique les agglomérations dans la pâte. La pâte fabriquée à vitesse élevée, avec une énergie de malaxage élevée provoque plus d'énergie dans le système et crée une structure plus brisée, qui donnent une viscosité et une thixotropie faible.

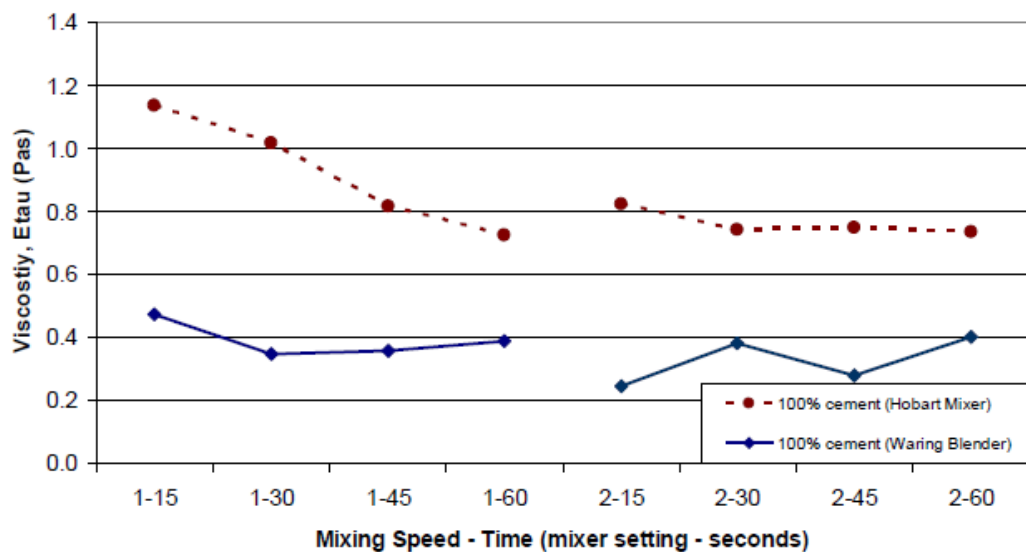


Figure 1.38 : Viscosité plastique en fonction du temps et de la vitesse de malaxage (Rupnow et al., 2007)

1.4.2.4 Teneur en air

Le malaxage développe l'énergie nécessaire dans le béton frais pour créer l'interface entre l'air et l'eau. Il forme d'abord les grandes bulles d'air, qui sont ensuite divisées en petites, tandis qu'il y a une coalescence des petites bulles d'air aux grandes bulles d'air. Concernant l'énergie, il est clair que, pour la même teneur en air, un béton contenant plus de petites bulles d'air possède une plus grande surface spécifique et demande une énergie plus élevée que celui qui contient de grandes bulles d'air. Ces dernières peuvent toujours s'échapper plus facilement à cause de leur plus grande force de flottabilité. L'énergie de malaxage peut affecter une quantité d'énergie en surface des bulles d'air qui équilibre la tension de surface des bulles d'air (Yang, 2012). Les bulles d'air, présentes dans le BAP à l'état frais avec l'air entraîné, peuvent être instables en raison du flottement et de la coalescence. Plus le béton est fluide, plus l'air est instable (Łaźniewska-Piekarczyk, 2013). Les bulles d'air se génèrent et disparaissent pendant le malaxage. Dans les premières minutes, plus de bulles d'air se forment dans le système et les grandes bulles d'air coalescent puis partent dans l'atmosphère. La Figure 1.39 présente l'effet d'une agitation prolongée sur la teneur en air. Les variations de la teneur en air dues à l'agitation prolongée peuvent s'expliquer par la relation qui existe entre l'affaissement et la teneur en air. Dans le cas des bétons à affaissement élevé, la teneur en air augmente avec la durée de l'agitation à mesure que l'affaissement diminue jusqu'à environ 150 à 170 mm. Si l'agitation continue, l'affaissement et la teneur en air diminuent. Mais dans le cas de béton à affaissement initial faible (moins de 150 mm), la teneur en air diminue de même que l'affaissement au fur et à mesure que l'agitation se prolonge (Kosmatka et al., 2004).

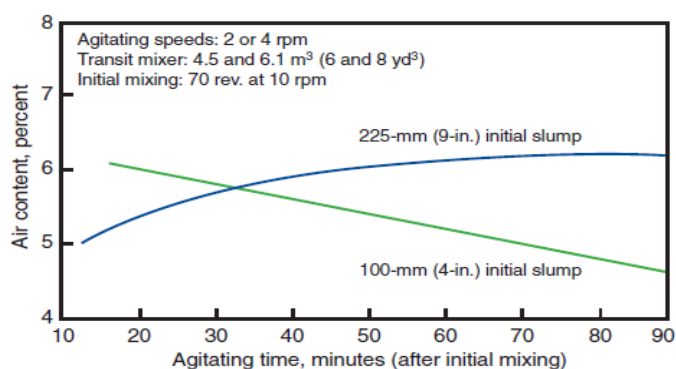


Figure 1.39 : Relation entre la durée de l'agitation, la teneur en air et l'affaissement du béton (Kosmatka et al., 2004)

1.4.2.5 Résistance en compression

Le temps de malaxage entraîne une très faible variation de la résistance à la compression. Par contre, la vitesse de malaxage change plus la résistance à la compression au jeune âge que la résistance à long terme (Rupnow et al., 2007). La Figure 1.40 montre qu'entre le malaxeur Hobart (vitesse faible) et le malaxeur Waring (vitesse élevée), l'écart de la résistance à la compression au jeune âge (trois jours) n'est plus négligeable. Concernant l'ordre d'introduction du SP, El-Didamonya (El-Didamonya et al., 2012) trouve que la résistance à la compression s'améliore avec le temps d'introduction du SP dans le mélange cimentaire, mais ce délai doit être inférieur à 15 minutes.

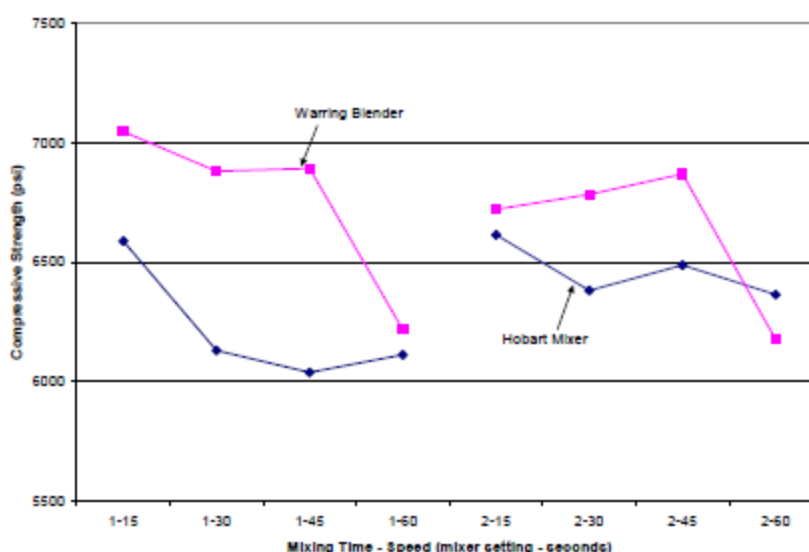


Figure 1.40 : Résistance à la compression à trois jours en fonction du temps et de la vitesse de malaxage (Rupnow et al., 2007)

1.4.2.6 Précautions

Le matériel utilisé pour le transport du béton doit être fréquemment nettoyé à l'eau pour ne pas introduire des corps étrangers ou des déchets dans le béton. Le matériel sera tel que la hauteur de chute du béton lors du coulage, ou les chocs mécaniques durant la manutention, ne soient pas de nature à créer des problèmes de ségrégation dans le béton.

La durée de transport du béton doit être limitée en fonction des conditions ambiantes de température, d'hygrométrie ou de vent. Elle ne peut dépasser 1h30 en ce qui concerne le transport en camion-toupie. Le béton conventionnel fabriqué sur le chantier doit être mis en œuvre moins de 30 mn après sa confection.

1.5 Synthèse

Selon le développement du marché de la construction, les maîtres d'ouvrage, les architectes, les entrepreneurs du BTP ont toujours recherché des bétons permettant une mise en place facile, un faible coût en main d'œuvre, une amélioration de la qualité d'ouvrage et de la durabilité, etc. Le béton autoplaçant apparu dans les années 1980 au Japon, qui est très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration, avec sa compaction obtenu par le seul effet gravitaire, répond largement à ces exigences et occupe actuellement une part importante du marché du béton. Les caractéristiques spécifiques des BAP entraînent une formulation plus pointue que celles des bétons traditionnels. Le rapport E/L est plus faible, la teneur en fines est élevée, le diamètre maximal des granulats est limité, et l'utilisation des adjuvants chimiques dans les BAP est alors indispensable. Les différences de propriétés rhéologiques et d'hydratation entre le béton conventionnel et le BAP demandent des exigences supplémentaires lors de la formulation du BAP : le prolongement du temps de malaxage du BAP pour l'homogénéité de mélange, l'utilisation d'une agitation adaptée du béton pendant le transport et avant le pompage pour éviter la ségrégation de BAP, la limite de la pression latérale du BAP sur le coffrage, le report du délai de décoffrage à cause des adjuvants.

De nombreuses recherches indiquent que le béton est influencé par les facteurs internes (les paramètres de formulation du béton, la nature des matériaux appliqués, etc.) et par les facteurs externes (impacts climatiques, transport, malaxage, etc.). En plus des effets du rapport E/L, des granulométries, les pourcentages de sable et gravillon et le remplacement des ajouts cimentaires, le SP est souvent utilisé pour régler la fluidité et le VEA pour améliorer la stabilité du béton. La nature ou la compatibilité entre les adjuvants, ou entre adjuvants et liant donnent des effets significatifs sur les propriétés rhéologiques et la durabilité. De plus, les conditions climatiques, la procédure de fabrication, le temps et d'agitation pendant le transport changent la fluidité et la stabilité de béton. Deux facteurs externes, la température et le malaxage ou l'agitation avant mise en place, ont des impacts sur l'efficacité du SP, l'hydratation, les propriétés rhéologiques, la teneur en air et la durabilité du béton. L'augmentation de la température ou l'élévation de l'énergie de malaxage ou d'agitation accélèrent l'adsorption du SP et la réaction d'hydratation, ce qui diminue la fluidité, augmente le seuil de cisaillement et la thixotropie mais diminue la viscosité plastique des bétons. La résistance est améliorée au jeune âge mais la durabilité est diminuée à long terme.

Les BAP sont formulés de manière à obtenir le compromis optimal entre fluidité et résistance à la ségrégation et au ressuage. Ces propriétés du béton sont influencées par les conditions internes (E/C, granulométrie de granulats, les adjuvants, etc.). En outre, les conditions externes comme la température et l'agitation du béton peuvent changer l'efficacité des adjuvants et influencer les performances du béton. Actuellement, il y a peu de recherches sur l'effet et l'effet couplé de la température et de l'agitation sur le béton, notamment le BAP. Les chercheurs (Al-Martini, Petit et Assad) ont étudié l'effet de la température et l'effet couplé de la température et le temps sur les propriétés rhéologiques de BAP mais la fluidité initiale du BAP varie avec la température (Assaad et al., 2003; Nehdi et Martini, 2007; Petit et al., 2007). Helnan-Moussa a seulement étudié l'effet de la température sur le dosage en agent de viscosité et la thixotropie du BAP à même fluidité initiale (Helnan-Moussa, 2009). Vickers a étudié la corrélation entre l'étalement et l'agitation dans le temps à deux vitesses d'agitation différentes sur béton conventionnel (Vickers et al., 2005), mais il n'a pas précisé l'effet d'agitation sur les propriétés rhéologiques comme le seuil de cisaillement et la viscosité plastique et la performance du béton.

Afin de faciliter l'ajustement de la formulation du BAP en fonction des conditions de mise en place sur chantier et des conditions météorologiques, les effets ou l'effet couplé de la température et de l'agitation (le temps d'agitation et la vitesse d'agitation) pendant la période de transport ou de repos sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de différents types de béton fluide à rhéologie adapté, le béton autoplaçant et le béton semi-autoplaçant, seront analysés dans la suite de cette thèse.

Chapitre 2 Programme expérimental

Le climat local et le transport entre l'endroit de bétonnage et le site de fabrication de béton influencent les propriétés du béton frais et durci. Comme cité précédemment dans la revue bibliographique, il n'existe pas ou très peu de recherche sur ces effets sur les propriétés de béton autoplaçant (BAP), qui est généralement plus sensible à la température et au transport par rapport le béton conventionnel. L'originalité de cette thèse réside sur trois aspects :

a) L'utilisation de mortier de béton équivalent (MBE) afin de prédire les propriétés du béton. Il y a peu d'informations dans la littérature sur la relation entre MBE et BAP. Assaad (Assaad et Khayat, 2005) constatent que, pour un type de liant donné, l'augmentation de la teneur en liant donne une augmentation de la thixotropie dans le cas du MBE, mais c'est le contraire dans le cas du BAP. La méthode MBE ne peut pas être utilisée quand la teneur en liant est trop importante pour prédire la thixotropie de BAP. Ensuite Erdem (Erdem et al., 2010) a comparé des mélanges de BAP et de MBE correspondants avec un dosage de 450 kg/m^3 de liant ternaire sur les propriétés rhéologiques. Ils ont établi une bonne corrélation du seuil de cisaillement, de la viscosité plastique, et de la thixotropie entre le MBE et le BAP. Dans notre étude, quelle que soit la température, le dosage de SP a été ajusté pour obtenir la même fluidité initiale de mélange cimentaire.

b) La prise en compte de l'effet de la variation de température sur le BAP. La température idéale d'un béton est $10\text{-}15^\circ\text{C}$ (Kosmatka et al., 2004), mais il est plus difficile de l'obtenir. Afin d'économiser le coût pour le refroidissement ou le réchauffement, la température du béton autorisée par CSA A23.1 se situe entre 5 à 35°C . En effet, des travaux récents ont démontré les effets significatifs de la température de béton sur les propriétés des BAP frais comme la fluidité, la demande en SP et les propriétés rhéologiques (Petit et al., 2007 ; Nehdi et Al Martini, 2009 ; Ghafoori et Diawara, 2010). La température de BAP initiale après la fabrication est identique à la température ambiante dans cette thèse. L'effet de la température est ainsi évalué sur la teneur en air, la résistance de la compression et la durabilité du BAP.

c) La prise en compte de l'effet de l'agitation et l'effet couplé de la température et de l'agitation dans le temps avant la mise en place du BAP. Le site de fabrication n'est pas toujours à côté de l'endroit où on coule le béton. Selon les particularités du BAP, le maintien de l'homogénéité et l'ouvrabilité du BAP pendant le transport et avant la mise en place sont très importants. L'effet de l'agitation pendant le transport n'est pas négligeable sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des BAP. La vitesse d'agitation de 2 à 6 tr/min qui correspond dans le cas du transport dans le camion toupie sera appliquée dans cette thèse, ce qui est différent que des autres recherches qui homogénéise manuellement et instantanément les mélanges cimentaires avant les mesures (Petit, 2005) ou malaxe continûment les mélanges cimentaires à 60 tr/min (Gołaszewski et Szwabowski, 2004),

L'originalité de cette thèse est d'étudier les effets de la température et de l'agitation sur les BAP et sur les mortiers correspondants. L'objectif est de permettre de créer une base de données sur les BAP avec différents types de SP, ajouts cimentaires et pour différentes conditions externes. Ils devront permettre de prédire les propriétés des BAP en changeant l'environnement et savoir quelles sont les précautions à prendre. Les méthodologies, les caractérisations des matériaux et les formulations de mélanges cimentaires étudiés pour les effets ou les effets couplés de la température et de l'agitation sont présentés dans ce chapitre.

2.1 Méthodologie expérimentale

2.1.1 Paramètres de l'environnement contrôlé

Afin d'étudier l'effet de la température et de l'agitation de BAP, la fabrication et les tests dans le temps ont été réalisés dans une chambre environnementale afin de garder la température constante pendant l'essai. Les paramètres d'environnement contrôlé sont présentés ici :

2.1.1.1 Température

Selon les températures limites des bétons lors de leur mise en place (Tableau 1.1) et les températures limitées de la chambre environnementale dans laboratoire, une température de référence de béton (22°C), deux températures représentant un temps froid (8°C et 15°C) et deux températures représentant un temps chaud (29°C et 36°C) ont été étudiées pour chaque type de mélange (béton ou mortier). La température de la chambre environnementale d'où on fabrique le béton et la température initiale du béton étaient identiques. Tous les essais ont été réalisés dans la chambre environnementale afin de contrôler la température de béton frais pendant les tests ($\pm 1^\circ\text{C}$). Jusqu'à 7 jours, les bétons ont durci et mûri à cette même température. 7 jours après, les bétons ont été sortis de cette chambre et mûris à la température de référence (22°C).

2.1.1.2 Agitation

À chaque type de mélange, deux vitesses d'agitation (faible ou élevée) ont été choisies. Pour les bétons, la vitesse faible était de 2 tr/min et la vitesse élevée de 6 tr/min. Pour les mortiers, la vitesse faible ou élevée étaient plus grandes grâce à la meilleure stabilité du mélange, soit 6 et 18 tr/min respectivement. La vitesse minimale du malaxeur pour le MBE était de 60 tr/min. Deux types de malaxeur pour le béton ont été utilisés : malaxeur horizontal à vitesse fixée en France (60 tr/min) ; malaxeur vertical à vitesse variable au Canada (4 à 20 tr/min). Comme il n'était pas possible d'avoir une agitation continue (malaxeur horizontal à vitesse fixée) dans le temps avant la mise en place, nous avons choisi l'utilisation de l'agitation discontinue dans le temps à la place de l'agitation continue. Vickers (Vickers et al., 2005) a montré que la variation de fluidité de béton dépend plutôt de l'énergie d'agitation. Si le nombre de tour cumulé est identique (à la vitesse faible mais avec la durée de malaxage élevée ou à vitesse élevée mais avec la durée de malaxage faible), les résultats sur l'étalement seront similaires (Figure 2.1). Le principe

utilisé pour l'agitation dans cette thèse était : pendant la même période, le nombre de tours cumulés contenus dans l'agitation discontinue était égal à celui de l'agitation continue. Cette agitation discontinue donne le même effet sur le BAP que l'agitation continue. Donc deux types de malaxage continu ou discontinu pour les mélanges cimentaires étaient appliqués pendant une durée (Figure 2.1).

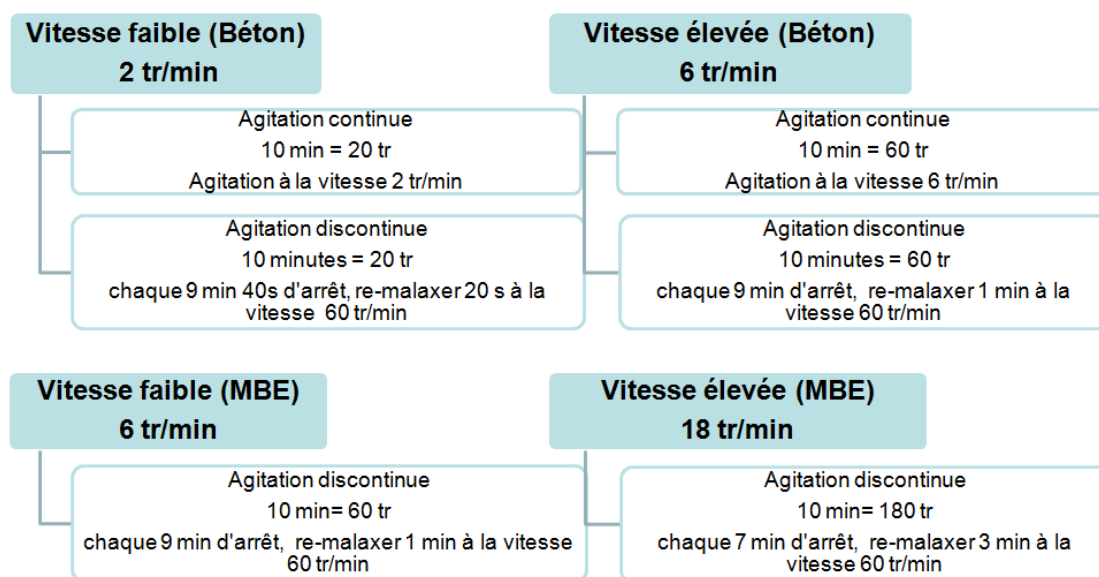


Figure 2.1 : Deux agitations à vitesse élevée et vitesse faible pour le béton et le mortier

2.1.1.3 Humidité relative et évaporation

Avec la condition limite de la chambre environnementale, l'humidité relative (HR) de la chambre variait avec la température (Tableau 2.1). Avant la fabrication du mortier ou du béton, les matériaux étaient bien stockés sans influence de l'HR de la chambre. Pendant la fabrication et les essais, l'effet de l'HR de la chambre environnementale sur les mélanges cimentaires était négligé. La température d'ambiance et la température de béton étaient quasiment identiques ($\pm 1^\circ\text{C}$) et il n'y a pas de courant d'air. Une évaporation élevée existe quand l'HR est faible et la vitesse du vent élevée (Topçu et Elgün, 2004). Selon la Figure 2.2 on a considéré que l'évaporation de l'eau en surface des mélanges cimentaires était négligeable sauf pour les mélanges à 36°C . A température élevée (36°C), l'évaporation du mélange cimentaire apparaît, la température de mélange diminue rapidement dans le temps après la fabrication. Finalement, les essais étaient arrêtés 40

minutes après le contact eau-ciment à 36°C à cause de la variation significative de la température de mélange et de l'évaporation.

Tableau 2.1 : Humidité relative et Température dans la chambre environnementale

Environnement conditions dans la chambre environnementale					
Température (°C)	8	15	22	29	36
Humidité relative (%)	70	50	40	35	30

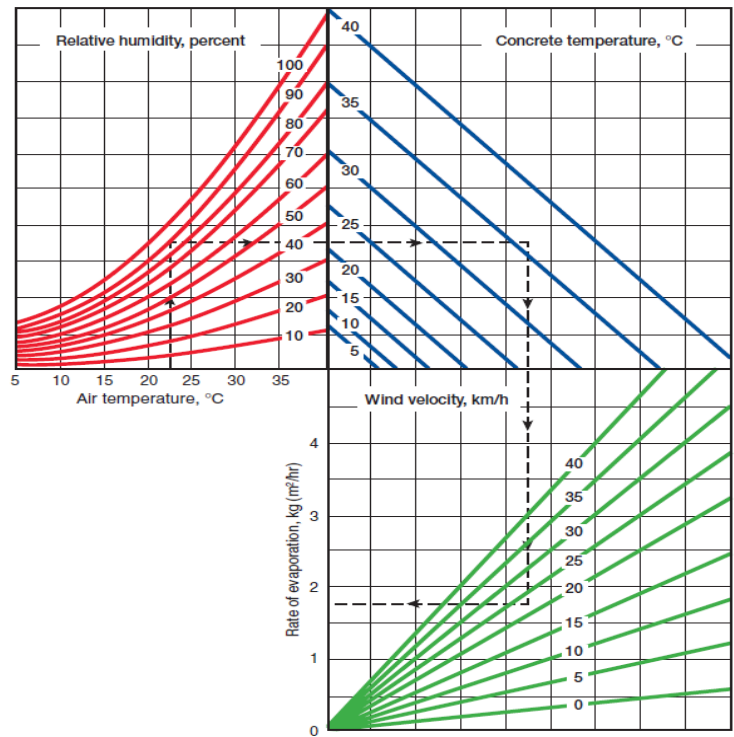


Figure 2.2 : Estimation du taux d'évaporation d'eau en surface du béton (Menzel, 1954)

2.2.2 Paramètres d'essai

L'effet de la température et de l'agitation a été étudié sur les propriétés chimiques, rhéologiques, calorimétriques et les propriétés de durabilité du mortier et du béton. Les paramètres de mesure en détail sont présentés ci-après :

2.2.2.1 Paramètres chimiques

La structure chimique et la masse moléculaire des PC utilisés dans cette thèse sont inconnues. La méthode de l'Ultraviolet/Visible (UV/Vis) spectroscopie et le BET seront utilisés pour comprendre l'efficacité de PC à différentes températures. L'effet de SP sur la fluidité des mélanges cimentaires est liée à l'adsorption de SP et la surface spécifique des hydrates (Hanehara et Yamada, 2008). Cette dernière est mesurée par le BET. La spectrophotométrie UV permet de mesurer l'adsorption de la lumière et de calculer la concentration libre de PC dans la solution, ce qui aide à expliquer la tendance de l'adsorption de PC par l'effet de la température. Mais cette méthode utilisée ne peut pas calculer la quantité de l'adsorption de PC sur les grains de ciment.

La spectrophotométrie UV aide à estimer la consommation de PC, ce qui est liée à l'adsorption de PC. Son principe est simple : un faisceau de lumière de longueur d'onde λ traverse la solution à analyser. En mesurant la différence d'intensité du faisceau entrant et sortant on peut calculer l'intensité lumineuse absorbée par la solution et en déduire la concentration de la substance absorbante (Perche, 2004).

Tous les étalons sont préparés afin que leur absorbance soit dans le domaine linéaire de la loi de Beer-Lambert (Équation 2.1) :

$$\text{Équation 2.1: } A = \epsilon l C$$

Avec l : Longueur du trajet d'adsorption dans le milieu.

C : Concentration de l'échantillon.

ϵ : Coefficient d'adsorption.

La procédure d'UV/Vis spectroscopie commence par chercher à calibrer l'équation. Selon Nader Ghafoori (Ghafoori et Diawara, 2010 ; Barfield et Ghafoori, 2012), toutes les courbes de calibration sont créées pour la longueur d'onde d'adsorption à 265 nm et par les concentrations variables de PC dilué dans l'eau distillée. Deux types de SP (PNS et PC) et 4

concentrations pour chaque type de SP (10, 30, 50 et 70 g/litre d'eau) sont testés afin de déterminer la courbe de calibration avec les variations des températures (8°, 22° et 36°C).

Après le malaxage, une quantité de mortier est placée dans un flacon et centrifugée pendant 5 min à la vitesse de 3500 tr/min. La phase liquide en surface est testée 40 minutes après le contact eau-ciment par UV/Vis spectroscopie pour estimer l'absorbance de la solution. La phase solide est analysée par la technique de BET afin de connaître la surface spécifique d'hydrate (SSA m²/g).

2.2.2.2 Paramètre d'ouvrabilité

L'ouvrabilité des mortiers ou des bétons qui s'exprime par l'étalement, est mesurée par le mini-cône pour les mortiers ou le cône d'Abrams pour le béton (Figure 2.3). L'étalement du béton autoplaçant (BAP) est réalisé selon la méthode de la norme ASTM C1611. Mais pour le béton semi-autoplaçant (BSAP), qui est légèrement moins fluide que le BAP, le cône est rempli en une seule couche avec un pilonnage de 10 coups (Sotomayor Cruz, 2012). L'étalement de mortier de béton équivalent (MBE) correspond au BAP ou au BSAP est réalisé selon la méthode de la norme ASTM C1437 modifiée. Le MBE correspondant au BAP ou au BSAP est plus fluide que celui correspondant au béton conventionnel, donc le remplissage se faisait en une seule couche, sans pilonnage.

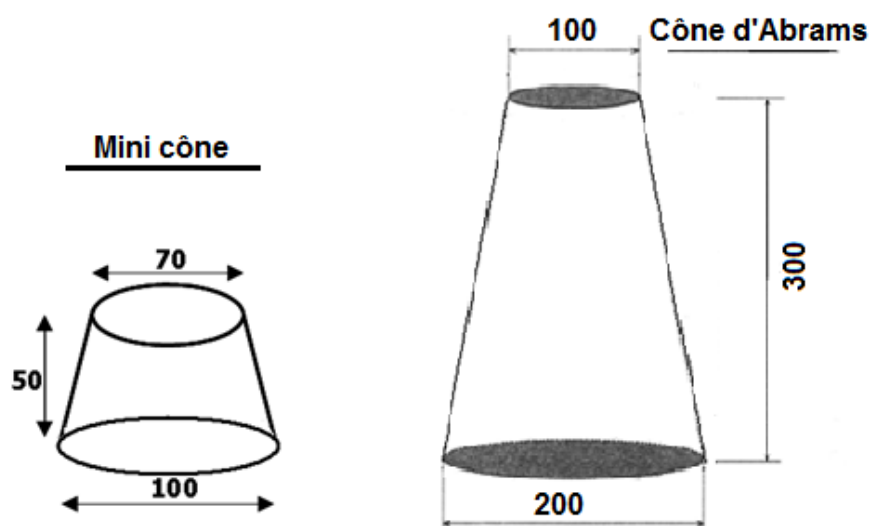


Figure 2.3 : Les cônes pour mesurer l'ouvrabilité

2.2.2.3 Paramètres rhéologiques

Les propriétés rhéologiques des mortiers et des bétons sont décrites par les paramètres fondamentaux du modèle de Bingham : le seuil de cisaillement (τ_o) et la viscosité plastique (μ_p). Elles sont mesurées par le Rhéomètre ConTec, qui est un rhéomètre à cylindres coaxiaux, avec les dimensions des cylindres montrées dans le Tableau 2.2. Un comportement de Bingham est montré à l'Équation 2.2.

Équation 2.2: Torque = G + H•Vitesse

Tableau 2.2 : Rhéomètre ConTec pour le béton et le mortier

	Rayon du cylindre externe R_o (mm)	Rayon du cylindre interne R_i (mm)	Hauteur effective H (mm)
Béton	145	100	100-150
Mortier	100	85	100-140

En mesurant le moment produit par un cylindre interne fixe tandis que le cylindre externe est en rotation à différentes vitesses, les valeurs de G (la force nécessaire pour initier un mouvement) et H (facteur viscosité) peuvent être déterminés. Figure 2.4 montre un exemple de résultat rhéologique du rhéomètre, à savoir un moment en fonction de la vitesse. De plus, au lieu de donner les deux paramètres G et H, ce rhéomètre peut fournir les paramètres τ_o et μ automatiquement à la fin de la mesure (ConTec Ltd., n.d.) :

$$\tau = \tau_o + \mu \dot{\gamma}$$

$$\tau_o = \frac{G}{4\pi h} \left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2} \right) \frac{1}{\ln(R_o/R_i)}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{(R_o^2 + R_i^2)}{(R_o^2 - R_i^2)} N$$

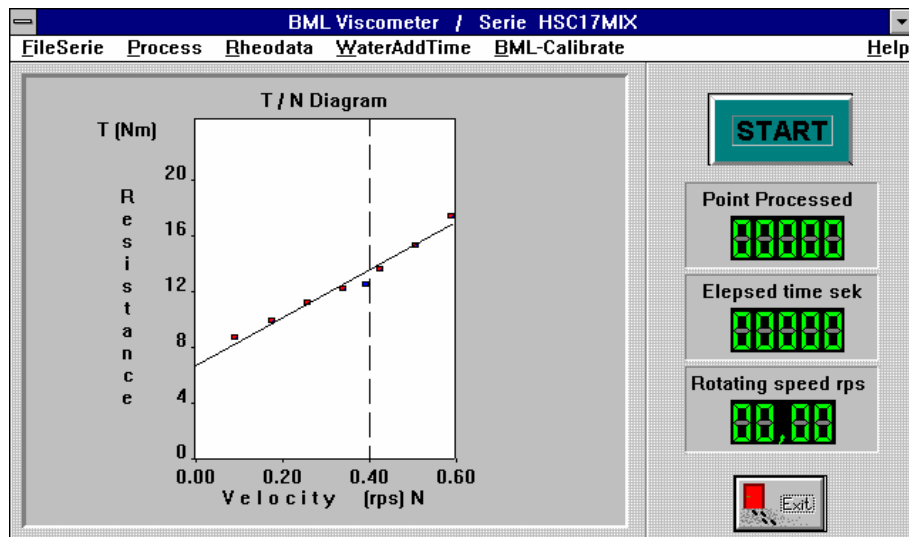


Figure 2.4 : Exemple de résultat du rhéomètre (ConTec Ltd., n.d.)

La vitesse de rotation du cylindre proposée par le ConTec Ltd est entre 0,1 à 0,6 tr/seconde pour les conditions d'essai normales. Selon les recherches actuelles (Roussel, 2006 ; Helnan-Moussa, 2009 ; ConTec Ltd., n.d.) et les expériences du groupe béton à l'Université de Sherbrooke, la vitesse de rotation du cylindre est choisi dans cette thèse entre 0,01 et 0,4 tr/seconde. Après un pré-cisaillement à 1 tr/seconde pendant 60 secondes, sept paliers de vitesse entre 0,01 et 0,4 tr/seconde et la durée de chaque palier à 10 secondes sont fixées dans le cas des mortiers et bétons très fluides. Enfin un point de stabilité est mesuré à la fin, comme montré dans la figure suivante :

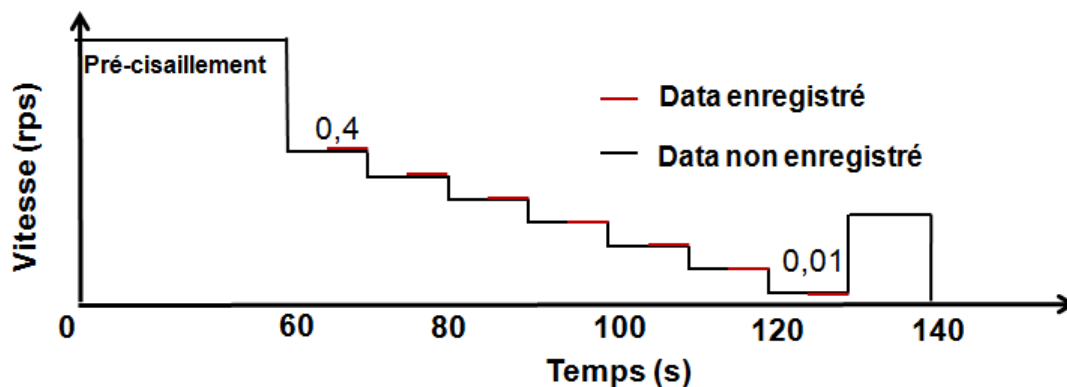


Figure 2.5 : Procédure du rhéomètre

2.2.2.4 Paramètres calorimétriques

La réaction d'hydratation des mortiers et des bétons peut se mesurer à l'aide de calorimètres. Les techniques actuelles de calorimétrie sur matériaux à matrice cimentaire ne donnent pas directement accès aux réactions en elles-mêmes, mais à leur effet exothermique, ce qui permet d'émettre des hypothèses quant à l'avancement de la réaction d'hydratation par la connaissance de l'énergie d'activation apparente, calculée à partir des résultats de calorimétrie. De nombreux procédés, tels que la calorimétrie semi-adiabatique, adiabatique, à conduction et isotherme permettent la détermination de la quantité de chaleur dégagée par l'hydratation. La réaction d'hydratation du ciment étant thermo-activée, il apparaît plus intéressant de travailler en condition isotherme, ce type d'essais présentant l'avantage fondamental de fixer le paramètre température (Feddal, 2006). Un calorimètre isotherme a été utilisé dans cette thèse. Des fluxmètres mis en place sur les faces du porte échantillon permet la mesure du flux dégagé lors de l'hydratation de l'éprouvette en fonction du temps $F(t)$ (Kada-Benameur et al., 1997). Un premier dispositif acceptant des échantillons prismatiques de dimensions 9 x 9 x 16 cm a été mis au point dans le cadre du Projet National français CALIBE. Ce calorimètre est adapté de par sa taille à des études sur Mortier de Béton Equivalent ou micro-béton. Un second dispositif a été développé pour étudier des échantillons de plus grandes tailles afin d'être représentatif des bétons (Kada-Benameur et al., 2000 ; Wirquin et al., 2002). Le choix s'est porté sur des éprouvettes cylindriques normalisées de dimensions 11 x 22 cm. Actuellement, le choix s'est porté sur un calorimètre plan de base 15 x 15 cm d'épaisseur réduite et variable (Wirquin et al., 2008) (Figure 2.6). Les essais peuvent être réalisés aussi bien sur mortier que sur béton. Les épaisseurs d'échantillon étaient de 3 et 6 cm pour le mortier et le béton respectivement. Le calorimètre isotherme utilisé nous permet d'améliorer la qualité des mesures et de se rapprocher au mieux des conditions réelles. L'avantage de cet appareillage est essentiellement sa souplesse d'adaptation puisqu'on peut faire varier la hauteur d'échantillon en fonction des compositions étudiées. De par sa conception plane, il minimise le chemin d'échange thermique entre l'éprouvette et les échangeurs qui assurent le maintien de la température d'essai. Enfin, cette géométrie assure un échange quasi-unidirectionnel et minimise les pertes thermiques par déperdition latérale.

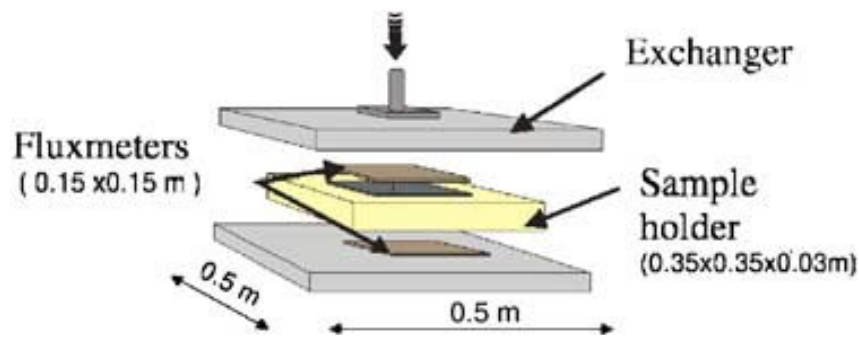


Figure 2.6 : Vue d'ensemble du dispositif expérimental de calorimètre (Wirquin et al., 2008)

2.2.2.5 Teneur en air

La teneur en air peut influencer la durabilité du béton et du mortier. Elle est mesurée respectivement selon la norme ASTM C185 et ASTM C231 pour le mortier et le béton. Selon ASTM C185, le mortier est rempli dans un bol de volume connu (400 ml). On déduit la teneur en air à partir de la densité mesurée du mortier, les densités des constituants connus, et les proportions du mélange par l'Équation 2.3. La teneur en air du béton est mesurée par la méthode de pression. Le principe de cette méthode repose sur la relation entre le volume d'air et la pression appliquée donnée par la loi de Boyle Mariotte.

Équation 2.3 : La teneur en air (%) = $100[1 - (\text{masse réelle} / \text{masse théorique})]$

Différent du béton conventionnel, le remplissage de l'échantillon dans l'aéromètre est plus simple. Pour le mortier ou le BAP, l'échantillon est rempli en une seule fois. Mais pour le BSAP, un pilonnage de 10 coups en 2 couches a été utilisé (Sotomayor Cruz, 2012).

2.2.2.6 Paramètre de la résistance en compression

La résistance à la compression du mortier est mesurée sur des cubes de 50 mm × 50 mm × 50 mm (au Canada) ou par les cubes à 40 mm × 40 mm × 40 mm (en France) selon la norme ASTM C109. La résistance en compression de béton est mesurée sur cylindre de 100 mm * 200 mm selon la norme ASTM C39 (Canada pour le BSAP) et de 160 mm * 320 mm (France pour le BAP). Les valeurs de résistance en compression sont mesurées à 1, 7, 28 et 56 jours. Le murissement de ces échantillons est différent entre la compression à court terme et à long terme, montré dans la Figure 2.7. Les échantillons ont démoulé après 24 heures dans la chambre environnementale (la température d'ambiance = la température de béton désirée). Les échantillons pour la résistance en compression à 7 jours ont gardé dans l'eau (la température d'eau = la température d'ambiance = la température de béton désirée). Les échantillons pour la résistance en compression à 28 et 56 jours sont dans la salle avec 100% humidité à 22°C après le démoulage à 1 jour.

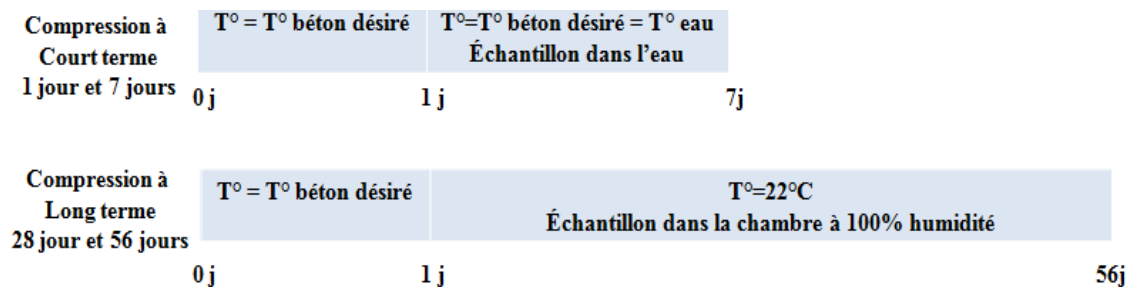


Figure 2.7 : Murissement des échantillons

2.2.2.7 Paramètres mécaniques

Les paramètres de durabilité comme la résistance au gel/dégel, l'écaillage et le retrait de séchage sont testés pour les BSAP afin de connaître l'effet de la température et de l'agitation sur la performance de BSAP durci avec la teneur en air comprise entre 5 et 8 %. Les détails de chaque essai sont présentés dans le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Les essais de durabilité sur les BSAP

Mesures	Moule (mm ³)	Compactage	Test-âge (jour)	Normes
Résistance en compression	Cylindre 100 × 200	1 couche 10 coups/couche	1, 7, 28 et 56	ASTM C39
Résistance au cycle de gel-dégel	75 × 75 × 350	2 couches 15 coups/couche	14	ASTM C666
Résistance à l'écaillage	250 × 280 × 75	1 couche 20 coups/couche	56	BNQ 2621-900
Retrait de séchage	100 × 100 × 400	2 couches 12 coups/couche	7	ASTM C157

2.3 Caractérisation des matériaux utilisés

Les travaux dans cette thèse ont été réalisés au Canada et en France. Les adjuvants introduits dans les mélanges cimentaires étaient les mêmes, mais les autres matériaux comme le ciment, le sable et le gravillon étaient différents dans ces deux endroits pour des problèmes techniques.

2.3.1 Ciments

Le ciment utilisé dans cette thèse est un ciment portland de type GU. Au Canada, ce ciment GU est fourni par la compagnie Holcim au Québec. Le ciment utilisé en France est le CEM I 52,5 N CE CP2 NF qui est fourni par Holcim en France. Les deux ciments sont quasi-similaires. Mais quelques différences existent dans les propriétés chimiques et physiques présentées dans les tableaux 2.4 à 2.7.

Tableau 2.4 : Analyse chimique et composition du ciment GU (Canada)

Identification	% en masse
SiO ₂	20,8
Al ₂ O ₃	4,3
Fe ₂ O ₃	2,4
CaO	62,5
MgO	2,2
SO ₃	3,5
C ₃ S	54
C ₂ S	19
C ₃ A	7,2
C ₄ AF	7,4

Tableau 2.5 : Propriétés physiques du ciment GU (Canada)

Finesse Blaine	397 m ² /kg
Finesse retenu 45 (28%)	6%
Expansion à l'autoclave	0,002%
Expansion dans l'eau	0,0014%
Temps de prise initial	165 min
Temps de prise final	285 min
Teneur en air	7,4 %

Tableau 2.6 : Analyse chimique et composition du CEM I 52,5 N CE CP2 NF (France)

Identification	% en masse
SiO ₂	20
Al ₂ O ₃	5,1
Fe ₂ O ₃	3,3
CaO	63,9
MgO	0,8
SO ₃	3,1
C ₃ S	60
C ₂ S	NA
C ₃ A	8,5
C ₄ AF	11

Tableau 2.7 : Propriétés physiques du CEM I 52,5 N CE CP2 NF (France)

Sur poudre		Sur pâte pure	
Masse volumique (g/cm ³)	3,1	Besoin en eau (en %)	30,2
Surface massique (cm ² /g)	4200	Stabilité (en mm)	0,4
Indice de clarté	64	Début de prise (en min)	160

2.3.2 Sables

Le sable utilisé au Canada est un sable naturel ayant une densité de 2,63 et un coefficient d'adsorption de 1,63%. Le sable utilisé en France est plus fin que celui au Canada, ayant une densité de 2,62 et un coefficient d'adsorption de 1%. Les granulométries des sables sont présentées dans la Figure 2.8. Le sable en France est plus fin que celui du Canada mais rentre dans le fuseau (CSA A23.1-00, GF1).

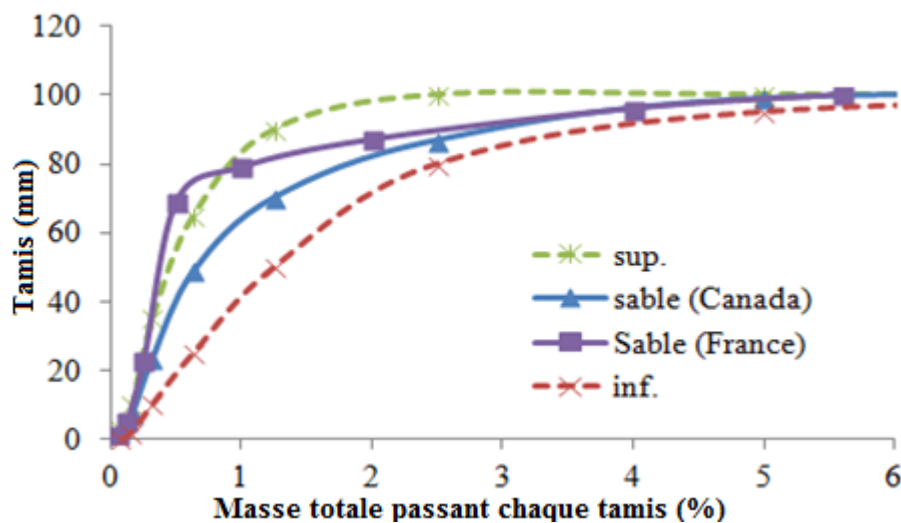


Figure 2.8 : Granulométrie des sables

2.3.3 Gravillons

Deux types des gravillons ont été utilisés au Canada et en France. Le Gravillon utilisé au Canada est un gravillon concassé ayant une densité de 2,74 et un coefficient d'absorption de 0,55%. Le gravillon utilisé en France est plus fin que celui au Canada, ayant une densité de 2,56 et un coefficient d'absorption de 1 %. La granulométrie des gravillons rentre dans le fuseau (CSA A23.1-00, Groupe 1, G 5 - 14), présentée dans la Figure 2.9.

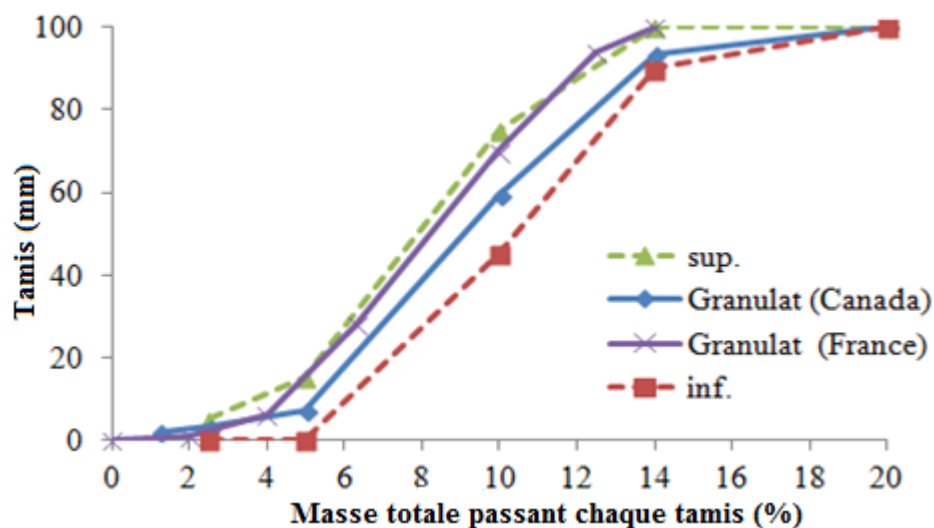


Figure 2.9 : Granulométrie des gravillons

2.3.4 Adjuvants

Au total, trois types de superplastifiant (SP) ont été utilisés dans cette thèse. On retrouve deux polycarboxylates (PC) et un polynaphtalène (PNS). Un agent viscosité (VEA) et un agent entraîné air (AEA) ont aussi été utilisés. Les densités et les extraits secs (Tableau 2.8) sont fournis par les partenaires de la chaire. Les types, les dosages et les combinaisons d'adjuvant utilisés dans les divers bétons ont été choisis par les partenaires.

Tableau 2.8 : Densités et extraits secs d'adjuvants

SP	Densité (g/ml)	Extrait sec (%*)
PC1	1,08	39,12
PC2	1,08	40,41
PNS	1,2	40,98
VEA	1,23	44,2
AEA	1	8,3

* : poudre active en % de masse de l'adjuvant liquide

2.3.5 Ajouts cimentaires

Les cendres volantes (CV) de classe F ayant une densité de 2,3 en France et 2,53 au Canada ont été utilisées dans certains bétons. L'analyse chimique de ce type de CV de classe F est présentée dans le Tableau 2.9.

Les fillers calcaires (FC) ayant une densité de 2,7 ont été utilisés en France. Leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.10

Le laitier (LT) ayant une densité de 2,93 a été utilisé au Canada selon la demande industrielle. Leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 2.11

La Fumée de silice (FS) ayant une densité de 2,24 en France et 2,2 au Canada ont été utilisées dans certains bétons. Leurs caractéristiques sont proches, présentées dans le Tableau 2.12.

Tableau 2.9 : Analyse chimique des cendres volantes de classe F

Identification	% en masse
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$(53,89 + 20,97 + 10,15) = 85,01$
SO_3	1,36
CaO	2,93
Teneur en humidité	0,05
Perte au feu	1,72
Na_2O /Alcalin total	0,64/4,31

Tableau 2.10 : Caractéristiques du filler calcaire

	Valeur
Blaine (m^2/kg)	362
Carbonates (%)	97,57
CaCO_3 (%)	97,22
S (%)	0,02
Cl^- (%)	0,00
SO_3 (%)	0,06
Indice d'activité (%)	0,86
Matière organiques (%)	0,02

Tableau 2.11 : Caractéristiques du Laitier

	Valeur
Blaine (m ² /kg)	533
Retenu sur 45 micron (%)	0,90
Expansion autoclave (%)	0,5
Sulfure (S) (%)	1,33
SO ₃ (%)	0

Tableau 2.12 : Caractéristiques de la fumée de silice

	FS (France)	FS (Canada)
surface spécifique BET (m ² /g)	entre 15 et 35	entre 18 et 22
Densité	2,24	2,20
SiO ₂ (%)	95	93
Na ₂ O équivalent (%)	0,6	0,2
SO ₃ (%)	≤ 2	≤ 0,4
Perte au feu (%)	≤ 4	≤ 3,5
CaO (%)	≤ 1	≤ 0,6

2.4 MBE et Béton

2.4.1 Méthode MBE

Le méthode de mortier de béton équivalent (MBE) peut être utilisée pour évaluer l'effet de différentes teneurs en ciment, les variations d'affaissement, la réduction du dosage en l'eau, la teneur en air, le temps de début de prise, et le développement de la résistance à la compression de béton conventionnel (Assaad et al., 2009). Actuellement, il y a très peu d'informations dans la littérature sur la relation entre le BAP et son MBE. En 2004, Assaad a trouvé que, pour un type de liant donné, l'augmentation de la teneur en liant augmentait la thixotropie du MBE, mais ce phénomène était opposé dans le BAP. Ceci semble être une limite d'utilisation le méthode MBE sur la thixotropie des BAP qui contient une teneur en liant élevée (Assaad et al., 2003). En 2010, Erdem a comparé les propriétés rhéologiques des BAP qui contiennent 450 kg/m^3 de liant ternaire et ses MBE correspondants. Ils ont établi une bonne corrélation entre MBE et ses BAP correspondants sur le seuil de cisaillement, la viscosité plastique, et la thixotropie (Erdem et al., 2010). Dans cette thèse, la perte de fluidité, les propriétés rhéologiques, le dégagement de chaleur et la résistance à la compression des MBE sont mesurés. La méthode MBE ne remplace pas les études traditionnelles de composition de béton, mais elle aide à étudier l'effet de la température et de l'agitation sur les propriétés du BAP par sa rapidité et sa simplicité.

Les principes de méthode MBE sont : la conception d'un mortier sur la base d'une composition de béton correspondant sans gros gravillons ; les gravillons du béton sont remplacés par les sables, parce que ce sont les surfaces de contact des constituants qui importent plutôt que leur volume (Schwartzentruber et Catherine, 2000). Les différents essais rhéologiques qui seront appliqués sur le mortier restent du même type que ceux qui le seront sur le béton correspondant. Ainsi, aux essais d'étalement au cône d'Abrams du béton correspondront les essais d'étalement au mini-cône du MBE. A chaque étalement du béton correspond un étalement constant pour son mélange MBE. Il existe une relation entre l'étalement du béton et celui du mortier (Erdem et al., 2010). L'étalement de MBE peut être calculé par l'Équation 2.4 :

Équation 2.4 :
$$r = \frac{V_{BAP}}{A_{BAP} * (D_{max})_{BAP}} = \frac{V_{MBE}}{A_{MBE} * (D_{max})_{MBE}}$$

V_{BAP} : le volume de béton contenu dans le cône d'Abrams (5495 cm³).

A_{BAP} : l'aire de la surface sur laquelle s'étale le béton.

$(D_{max})_{BAP}$: le diamètre du plus gros gravillon pour le béton.

V_{MBE} : le volume de mortier contenu dans le mini cône (287 cm³).

A_{MBE} : l'aire de la surface sur laquelle s'étale le mortier.

$(D_{max})_{MBE}$: le diamètre maximum du sable.

2.4.2 Formulation de MBE et BAP

Dans cette thèse, les travaux seront effectués sur trois types de béton à haute performance fluide et leurs mortiers de bétons équivalents (MBE) correspondants. Les compositions du béton et du MBE sont présentées respectivement dans les Tableau 2.13 et 2.14. Deux types de béton et trois types de MBE étudiés sont : le béton autoplaçant destiné aux travaux de bâtiment (BAP-B) ; le béton semi-autoplaçant destiné aux travaux d'infrastructure (BSAP-I) ; le mortier de béton équivalent du béton autoplaçant destiné aux travaux de bâtiment (MBE-B) ; le mortier de béton équivalent du béton autoplaçant destiné aux travaux de préfabrication (MBE-P) ; le mortier de béton équivalent du béton semi-autoplaçant destiné aux travaux d'infrastructure (MBE-I).

Tableau 2.13 : Compositions des bétons fluides à rhéologie adaptée

Béton	BAP-B	BSAP-I
E/L	0,45	0,41
Teneur en liant, kg/m ³	425	400
Liant	GU+25%CV	GU+25%CV+5%FS
Rapport S/G, en volume	0,45	0,5
SP, type	PC1/PNS	PC1/PNS
VEA (%)	0,142	0
AEA	NON	OUI
Étalement, (mm)	660 ± 20	500 ± 50

Tableau 2.14 : Compositions des MBE

Mortier	MBE-B		MBE-P		MBE-I	
	CV	FC	CV	FS	CV	LT
E/L	0,45	0,45	0,41	0,41	0,41	0,41
Teneur en liant, kg/m ³	650	650	670	670	600	600
Type de liant	GU+ 25%CV	GU+ 25%FC	GU+ 25%CV	GU+ 5%FS	GU+25% CV+5%FS	GU+25% LT+5%FS
Type de SP	PC1/PNS	PC1/PNS	PC2	PC2	PC1/PNS	PC1/PNS
VEA (%)	0,142	0,142	0,055	0,055	0	0
AEA	NON	NON	NON	NON	OUI	OUI
Étalement, (mm)	260 ± 10	260 ± 10	250 ± 10	250 ± 10	210 ± 10	210 ± 10

2.5 Plan expérimental

Le programme expérimental comporte trois phases (Figure 2.10), comprenant :

Phase I : Effet de la température et de l'agitation sur les propriétés des MBE

Phase II : Validation du BAP-B sur l'effet de la température sur la demande en SP, les propriétés rhéologiques et la résistance à la compression.

Phase III : Validation du BSAP-I sur l'effet de la température et de l'agitation sur la demande en adjuvant, les propriétés rhéologiques, la teneur en air, la résistance en compression et la durabilité (retrait de séchage, écaillage et résistance gel/dégel).

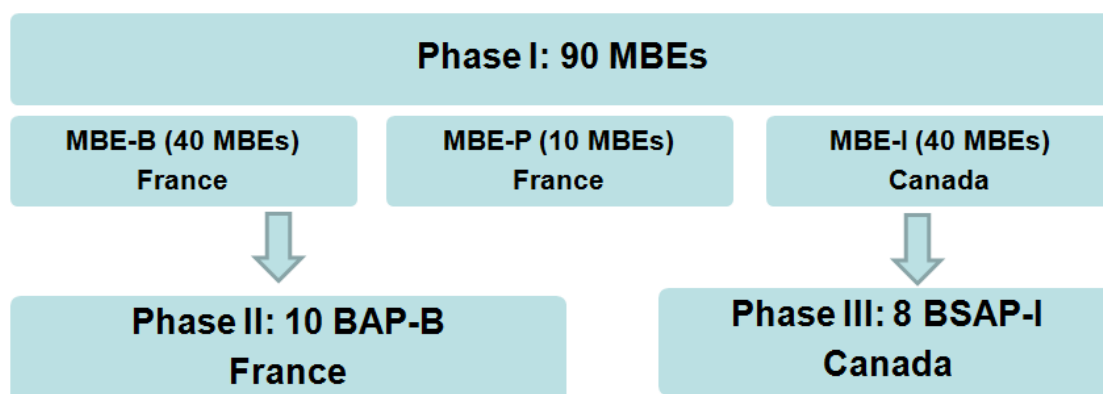


Figure 2.10 : Programme expérimental

2.5.1 Phase I : Effet de la température et de l'agitation sur les MBE

Cette phase étudie l'effet de la température et de l'agitation sur les propriétés des 3 types de MBE (MBE-B, MBE-P et MBE-I) avec les différents types et combinaisons d'adjuvant et d'ajout cimentaire s. Au total, quatre-vingt-dix mélanges MBE ont été testés en faisant varier la température de 8° à 36°C. L'effet de l'agitation a été étudié sur le MBE-B et MBE-I. Deux vitesses d'agitation différentes ont été utilisées : une vitesse faible (6 tr/min) et une vitesse élevée (18 tr/min). Pour le MBE-P, la vitesse d'agitation n'a pas varié, il n'a été utilisé que la vitesse faible (6 tr/min) à cause de la perte de maniabilité trop rapide dans le MBE-P qui est appliqué plutôt sur la préfabrication. Les organigrammes de programme de recherche pour MBE-B, MBE-P et MBE-I sont présentés respectivement dans les Figure 2.11, 2.12 et 2.13.

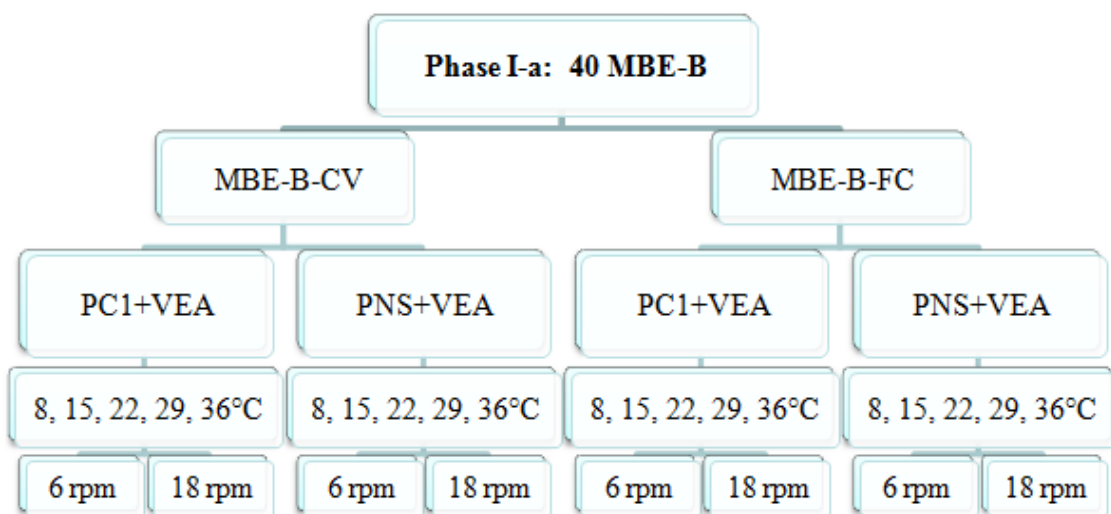


Figure 2.11 : Organigramme de programme de recherche pour les MBE-B

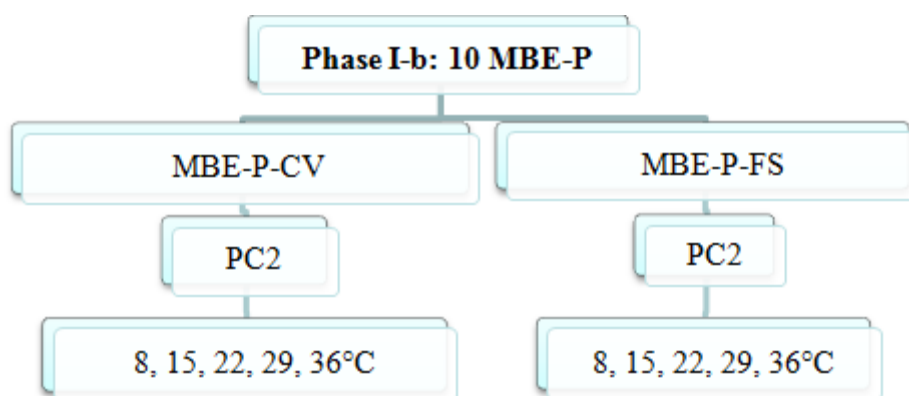


Figure 2.12 : Organigramme de programme de recherche pour les MBE-P

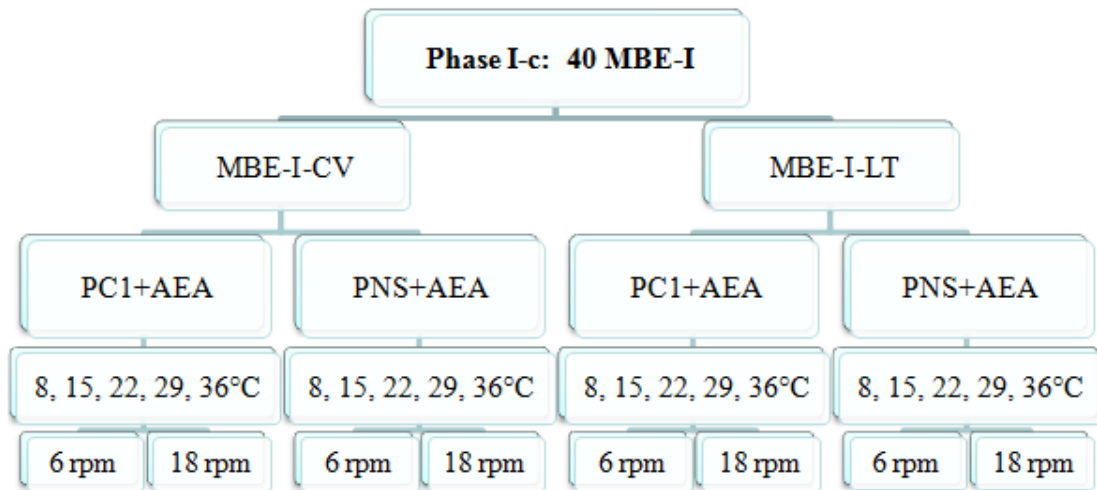


Figure 2.13 : Organigramme de programme de recherche pour les MBE-I

2.5.2 Phase II : Effet de la température sur les BAP-B

Cette phase a pour objectif de valider les résultats sur béton selon les résultats de la première phase obtenus de MBE-B. L'effet de la température a été analysé dans le BAP-B. Un seul liant binaire (75% GU + 25% CV) et une agitation faible ont été utilisés dans ce béton à cinq températures différentes. Dix bétons ont été fabriqués en utilisant le PC ou le PNS avec VEA (Figure 2.14). Le dosage en SP a été ajusté pour obtenir un étalement de 660 ± 20 mm avec un dosage de VEA fixé (0,142%).

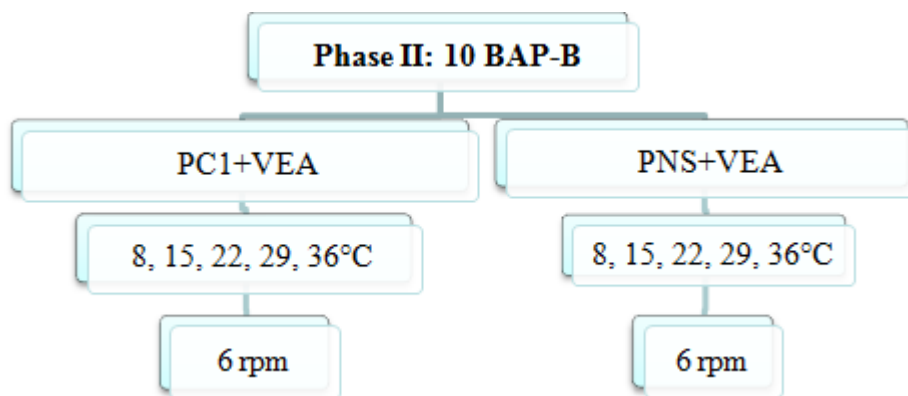


Figure 2.14 : Organigramme de programme de recherche pour les BAP-B

2.5.3 Phase III : Effet de la température et l'agitation sur les BSAP-I

Cette phase a pour objectif de valider les résultats sur béton selon les résultats de la première phase obtenus de MBE-I. L'effet de la température et de l'agitation sont analysés sur le BSAP-I. Un seul liant ternaire (70% GU + 25% CV + 5%FS) a été utilisé dans le béton. Six bétons à deux températures extrêmes (8° et 36°C) et une température de référence (22°C) ont été fabriqués avec une vitesse d'agitation élevée (6 tr/min) pour l'effet de la température. D'autre part, le béton à température de référence (22°C) a également été étudié avec la vitesse d'agitation faible (2 tr/min) afin de vérifier l'effet de l'agitation. L'organigramme de programme de recherche pour BSAP-I est montré dans la Figure 2.15. Les dosages en SP et AEA ont été ajustés pour obtenir un étalement de 500 ± 50 mm et une teneur en air initiale entre 5 à 8 %.

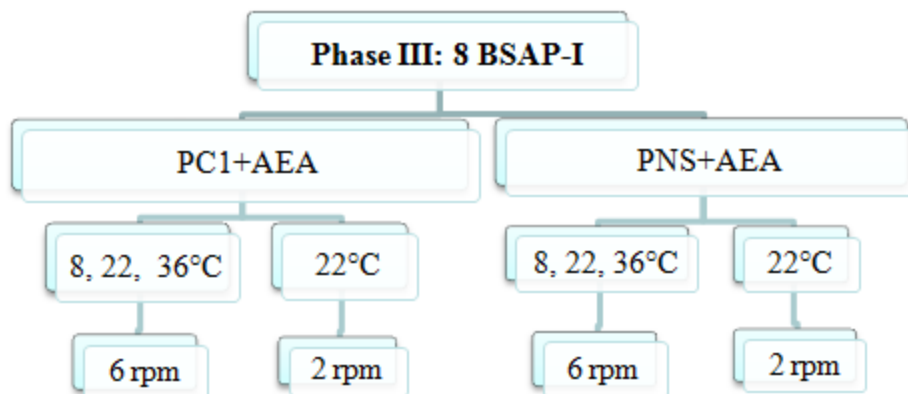


Figure 2.15 : Organigramme de programme de recherche pour les BSAP-I

2.6 Procédures de malaxage

Le but du malaxage pour le béton et le MBE est d'assurer un mélange homogène et de donner une bonne performance aux matériaux cimentaires. Le temps de malaxage du BAP et du MBE dans cette thèse était plus long que celui d'un béton conventionnel à cause des multiples types d'adjuvant dans le mélange. Le malaxage des MBE a été fait à l'aide d'un malaxeur « Gros Hobart » d'une capacité de 10 L en France et au Canada. Le malaxeur des BAP en France et celui au Canada était différent. En France, 35 litres de BAP-B ont été fabriqués pour chaque essai à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'une capacité de 50 L. La quantité de BSAP-I fabriquée au Canada était plus grande. 100 litres de BSAP-I ont été fabriqués à chaque fois à l'aide d'un malaxeur « Gros Monarch Vitesse Variable » d'une capacité de 150 L.

Afin d'avoir des résultats comparables, la procédure de malaxage du MBE et du BAP était identique comme suit :

- Introduire tout le sable (gravillon s'il y a lieu) et 2/3 d'eau (AEA s'il y a lieu) et malaxer 30 secondes à vitesse 60 tr/min.
- Introduire le ciment et les ajouts cimentaires, démarrer le chronomètre ($T = 0$ minute contact eau-ciment) et malaxer à vitesse 60 tr/min.
- Introduire le SP et rincer le récipient avec 1/3 d'eau qui reste après une minute sans arrêter le malaxage ($T = 1$ min).
- Introduire le VEA dans le malaxeur une minute après avoir introduit le SP sans arrêter le malaxage ($T = 2$ min).
- Arrêter le malaxage et raclage de la paroi de la cuve ($T = 4$ min).
- Recommencer le malaxage après trois minutes de repos ($T = 7$ min).
- Arrêter le malaxage après deux minutes à la vitesse de 60 tr/min ($T = 9$ min).

Les essais sur le béton ou le MBE frais ont été effectués à 10, 40 et 70 min (ou 130 min selon la fluidité de mélange). Pendant les essais dans le temps, l'agitation du mélange cimentaire continue, présenté dans la section précédant. Pour le BSAP-I, l'agitation continue a été utilisée grâce au malaxeur à vitesse variable, alors que pour le BAP-B et le MBE, l'agitation discontinue a été choisie.

2.7 Procédures d'essai

2.7.1 Essais MBE

Les essais sur MBE à l'état frais sont effectués jusqu'à une maniabilité du MBE faible (l'étalement ≤ 140 mm). Il y a une répétition de ces essais à chaque échéance de 30 min ou chaque 60 min, en fonction de la maniabilité du mélange. La maniabilité, la stabilité, les propriétés rhéologiques, la rétention dans le temps, le dégagement de chaleur et la résistance en compression des MBE sont effectués (Tableau 2.15) dans l'ordre suivant :

- Température,
- Etalement,
- Rhéomètre,
- Teneur en air,
- Calorimètre (s'il y a lieu),
- Résistance en compression.

Tableau 2.15 : Essais pour le MBE

Propriétés	Mesures	Appareils	Temps après le contact eau-ciment	Normes
Ouvrabilité	Mini-étalement	Mini-cône	Chaque 30/60 min	ASTM C1437
Rhéologie	Seuil de cisaillement	Rhéo ConTec	Chaque 30/60 min	
	Viscosité plastique			
Teneur en air	Air total	Bol en 400 ml	10 min/ 60 min	ASTM C185
Temps de début de prise	Dégagement de la chaleur	Calorimètre isotherme	20 min à 3 jours	
Propriété mécanique	Resistance en compression	Presse	1, 7, 28 et 56 jours	ASTM C 39

2.7.2 Essais Béton

Afin de pouvoir comparer les résultats entre le MBE et le béton, les mêmes propriétés sont étudiées pour validation du béton. En plus des mêmes propriétés testées, les analyses sur la durabilité (retrait au séchage, résistance au gel/dégel et à l'écaillage) ont été réalisées pour les BSAP-I qui contiennent 5% à 8% d'air. Le protocole d'essai sur les bétons (Tableau 2.16) et la séquence d'essais similaire dans le béton est respecté comme suit :

- Température,
- Etalement,
- Rhéomètre,
- Teneur en air,
- Calorimètre (s'il y a lieu),
- Résistance en compression,
- Retrait au séchage (s'il y a lieu),
- Résistance au gel/dégel (s'il y a lieu),
- Résistance à l'écaillage (s'il y a lieu).

Tableau 2.16 : Essais pour le Béton

Propriétés	Mesures	Appareils méthode	Temps	Normes
Ouvrabilité	Etalement/ affaissement	Cône d'Abrams	Chaque 30/60 min	ASTM C143
Rhéologie	Seuil de cisaillement Viscosité plastique	Rhéo ConTec	Chaque 30/60 min	-----
Teneur en air	Air total	Aéromètre	10 min/60 min	ASTM C231
Temps de début de prise	Dégagement de la chaleur	Calorimètre isotherme	20 min à 3 jours	-----
Propriété mécanique	Résistance en compression	Presse	1, 28 et 56 jours	ASTM C39
Durabilité	Retrait de séchage	-----	7 jours à 70 jours	ASTM C157
Durabilité	Résistance gel/dégel	-----	14 jours	ASTM C666
Durabilité	Ecaillage	-----	56 jours	BNQ 2621- 900

2.8 Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter le programme expérimental réalisé afin d'évaluer l'effet de la température et de l'agitation sur les BAP et les MBE. De plus, les paramètres étudiés, les différents matériaux, les matériels, les plans expérimentaux et les procédures choisies ont été développés. Les résultats expérimentaux obtenus sur les MBE et les BAP sont présentés dans les chapitres suivants.

Chapitre 3 Effet de la température sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée et des mortiers correspondants

De nombreuses recherches ont déjà évoqué l'effet couplé de la température et du type de superplastifiant (SP) sur les variations de la fluidité et des propriétés rhéologiques ou mécaniques des mortiers et bétons. Par exemple, la variation de la température du béton peut influencer l'adsorption de SP sur les grains de ciment (Yamada et al., 1999; Hanehara et Yamada, 2008). Cette dernière influence la fluidité de différents ciments, le seuil de cisaillement ainsi que la viscosité plastique (Jolicoeur et al., 1997 ; Nawa et al., 2000 ; Fernández-Altable et al., 2006 ; Ovarlez et Coussot, 2007). Lafarge (Termkhajornkit et Barbarulo, 2012) a étudié l'effet de la température (de 20°C à 60°C) sur différents types de ciment Portland, différents E/C et différentes finesses de grains de ciment. Il a trouvé que la réaction d'hydratation était toujours plus rapide lorsque la température était plus élevée. Par contre, d'autres recherches ont trouvé que la température élevée pouvait favoriser le développement d'un réseau poreux plus grossier (Barbarulo, 2002 ; Gallucci et al., 2006 ; Lothenbach et al., 2007), ce qui cause une bonne résistance à court terme mais une mauvaise résistance à long terme. Pour le BAP et les mortier de béton équivalent (MBE), Assaad, Petit, Martini, Ghafoori et ses partenaires ont étudié l'effet de la température sur la variation de la fluidité, les propriétés rhéologiques ou la résistance en compression (Assaad et al., 2003 ; Petit et al., 2007 ; Nehdi et Martini, 2007 ; Ghafoori et Diawara, 2010). Toutefois, ces études ont été menées soit, avec le même dosage en SP mais en faisant varier la température, ce qui produit un état de fluidité et une stabilité variable après le malaxage soit avec la même fluidité initiale mais avec un dosage en SP différent selon la température. En revanche, peu d'études comparent la performance de BAP et de son mortier correspondant. En outre, le BAP et le MBE contiennent des dosages élevés en adjuvant, ce qui est affecté aussi par le changement de température. Existe-t-il une interaction entre deux paramètres (SP et température) ? L'effet du SP (le type de SP et le dosage en SP) sur la maniabilité est liée à l'adsorption de SP et la surface d'hydrates (Hanehara et Yamada, 2008). Ces deux dernières peuvent-elles être influencées par la température ? Si oui, l'effet significatif est-il plutôt sur l'adsorption du SP ou sur l'hydratation ? Quelles propriétés du BAP ou du MBE vont être influencées par l'effet

couplé de la température et du type de SP ou du dosage en SP ? Pour répondre à toutes ces questions intéressantes, les études dans ce chapitre seront présentées comme suit :

La première phase d'étude a pour but d'analyser l'adsorption du SP et la surface spécifique des hydrates à différentes températures (8, 22 et 36°C) dans le MBE-B. Cette phase d'étude utilise des techniques telles que la méthode ultraviolet-visible (UV/Vis) spectroscopie et la technique BET. Deux types de SP, un polycarboxylate (PC1) et un polynaphtalène sulfonate (PNS), ont été testés à différents dosages et températures. Ensuite, une confirmation d'étude sur l'influence de la fluidité du mélange cimentaire en fonction de la variation de température pour un dosage en SP fixé sera effectuée. Cette validation sera réalisée sur le MBE-B avec le PC1 et un type de liant binaire avec des cendres volantes (CV).

La deuxième phase d'étude a pour but d'analyser l'effet de la température en utilisant différents SP (type et dosage) et différents ajouts cimentaires sur la performance des MBE-B, MBE-P et du BAP-B. Ces trois dernières formulations de béton ou mortier ne contiennent pas d'agent entraîneur d'air (AEA), mais en revanche un agent de viscosité (VEA) afin d'avoir un mélange cimentaire stable.

La dernière phase d'étude a pour but d'analyser l'effet de la température en utilisant différents SP (type et dosage) et différents ajouts cimentaires mais sur la performance du béton semi autoplaçant destiné aux travaux d'infrastructure (BSAP-I) et du mortier de BSAP-I équivalent (MBE-I). Ces types de béton et mortier contiennent un AEA afin de contrôler la teneur en air nécessaire pour un BSAP-I.

3.1 Effet de la température sur l'adsorption de SP et la surface spécifique des hydrates du MBE-B

3.1.1 Adsorption de SP par la méthode UV/Vis spectroscopie

La structure chimique exacte et la masse moléculaire de l'adjuvant dans cette investigation sont inconnues. L'UV/Vis spectrophotométrie permet d'estimer la tendance de l'adsorption de PC sur les grains de ciment, mais sans quantifier le dosage d'adsorption. Après centrifugation du MBE-B avec le SP, l'UV/Vis spectroscopie a mesuré l'absorbance de la lumière traversant la phase liquide. Les valeurs d'absorbance ont permis de déterminer la concentration libre de SP dans la phase liquide, et donc estimer l'adsorption de SP sur les grains de ciment dans la phase solide.

La Figure 3.1 montre la calibration du PC1 dilué dans l'eau. Elle présente la variation de l'absorbance de lumière à 260 nm selon le dosage en SP et la température.

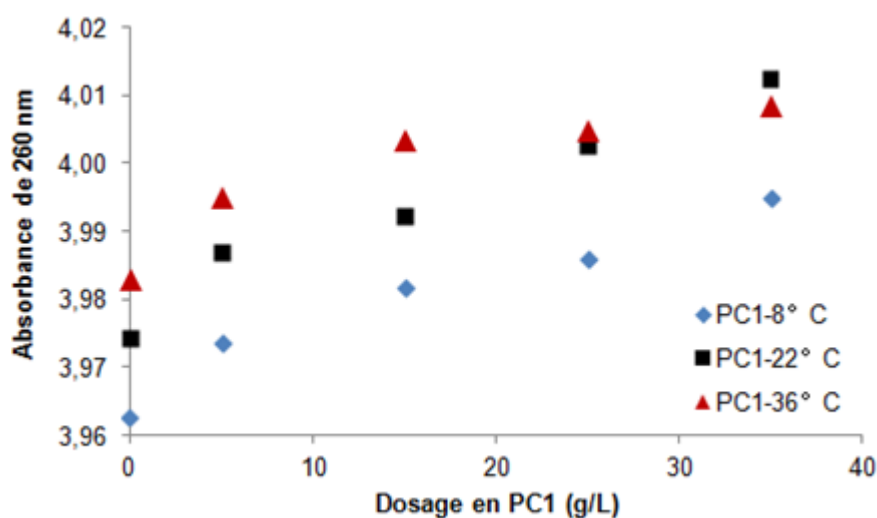


Figure 3.1 : UV/Vis spectroscopie de PC1+eau

Pour le PC1 dans l'eau, l'augmentation de la concentration de PC1 provoque une augmentation des valeurs d'absorbance pour toutes les températures, car l'augmentation de la quantité de molécules de PC1 aide à l'absorbance de lumière. L'absorbance est également influencée par la température. Plus la température est élevée, plus les valeurs d'absorbance sont grandes. Le changement de valeur d'absorbance lié à la variation de température peut être causé par l'activité et la taille des molécules de PC1 dans l'eau quand

il y a une même quantité de molécule PC1 dans l'eau. Entre 8 et 22°C, l'augmentation de l'absorbance est quasi-linéaire en fonction du dosage en PC1. Les valeurs d'absorbance pour le PC1 + eau à 8°C sont plus petites que celles à 22°C. La température faible réduit l'activité des molécules dans l'eau. L'écart de valeur entre deux températures pour tous les dosages en PC1 est similaire. Mais à température plus élevée (36°C), les valeurs d'absorbance sont légèrement plus grandes que celles à 22°C, l'écart entre 22 et 36°C est réduit par rapport celui entre 8 et 22°C. A la concentration étudiée plus élevée (35 g/L), la valeur d'absorbance est légèrement plus petite dans la solution à 36°C que celle à 22°C. Il existe un point de saturation sur l'augmentation de la valeur d'absorbance liée à la température, quand la concentration de PC est supérieure de 15g/L à 36°C.

La Figure 3.2 montre que les valeurs d'absorbance de lumière de PNS dilué dans l'eau augmentent avec l'augmentation de concentration de PNS dans l'eau. Les molécules de PNS sont beaucoup plus grandes et lourdes que les molécules de PC1, donc les valeurs d'absorbance sont plus grandes même si la concentration de PNS dans l'eau est plus petite. L'effet de la variation de température n'est pas très significatif. L'absorbance de lumière de PNS à 36°C est même plus petite que pour les autres températures.

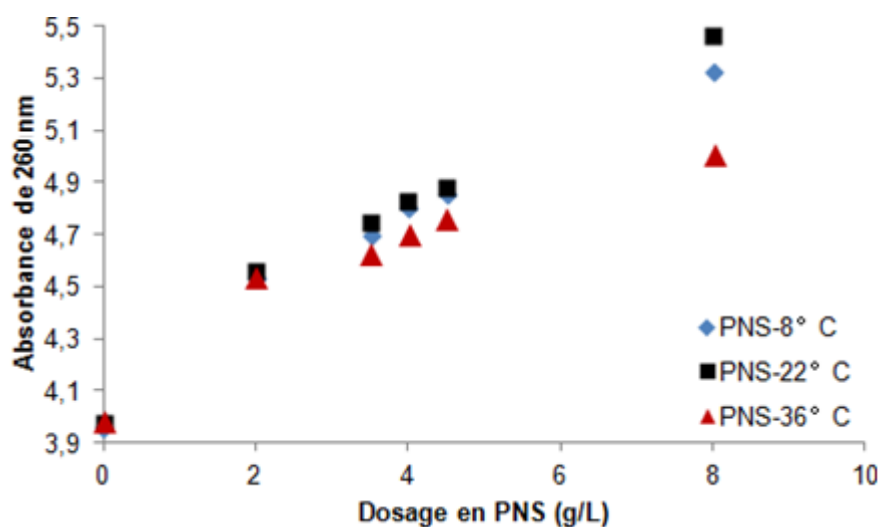


Figure 3.2 : UV/Vis spectroscopie de PNS+eau

Selon l'analyse précédente, on a remarqué que l'absorbance de la lumière par UV/Vis spectroscopie est influencée par la taille, la quantité et la température de SP dans l'eau. Appliqué au MBE, l'absorbance de la phase liquide de MBE-B-CV sans VEA

permet d'évaluer la quantité de molécules de SP qui sont libres, donc estimer celle consommée par le liant. Normalement, plus le SP est consommé jusqu'à la mesure, plus grande est la quantité de SP nécessaire pour garder la même fluidité. A 22°C, le MBE-B-CV est stable et fluide quand il contient du PC1 (426 ml/100 kg de liant) ou du PNS (767 ml/100 kg de liant) sans VEA. La Figure 3.3 montre l'absorbance de la phase liquide de MBE-B-CV après 40 minutes du contact eau-ciment à 8, 22 et 36°C sans changer le dosage en SP.

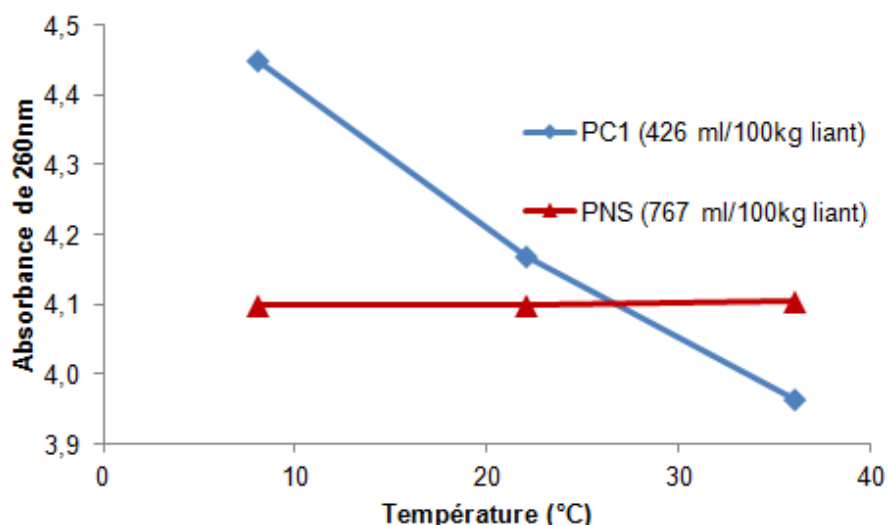


Figure 3.3 : UV/Vis spectroscopie de MBE-B-CV sans VEA contenant le PC1 ou le PNS après 40 minutes du contact eau-ciment

Les valeurs d'absorbance de PC1 diminuent linéairement avec l'augmentation de la température. Il y a donc moins de molécules de PC1 libres dans le liquide avec l'augmentation de la température, donc plus de molécules de PC1 consommées par les hydrates avant la mesure. À 36°C, les molécules de PC1 sont très activées et par conséquent, elles sont consommées rapidement par le liant. Il ne reste presque plus de molécules libres de PC1 dans le liquide. Par contre à 8°C, les molécules de PC1 sont moins actives, il reste donc plus de quantité de PC1 libre dans la phase liquide. Les valeurs d'absorbance sont élevées, mais le MBE-B-CV avec ce dosage en PC1 pose un problème sur la stabilité à 8°C, car le mortier est trop fluide. Les absorbances de PNS mesurés sont faibles et identiques à différentes températures. Avant le centrifugeage de la phase liquide et solide du MBE-B-CV, les molécules de PNS sont bien consommées. Il ne reste pas une grande quantité de

PNS dans le liquide. On ne voit pas l'effet de la température sur l'absorbance des molécules de PNS libres.

La Figure 3.4 compare l'absorbance de PC1 dans le MBE-B-CV avec un dosage fixe (l'étalement varie) et un dosage variable (l'étalement fixe). À 36°C, l'augmentation de 40% du dosage en PC1 par rapport au dosage en PC1 à 22°C pour l'amélioration de la fluidité n'amène pas de différence sur l'absorbance. Les deux valeurs d'absorbance sont très faibles, car les molécules de PC1 sont plus actives à température élevée ce qui accélère la consommation de PC1 avec le liant. Après 40 minutes du contact eau-ciment, presque tous les PC1 sont consommés dans le MBE à 36°C, l'effet de la température joue un rôle plus important sur la fluidité dans le temps que l'effet du dosage en PC1. À 8°C nous avons diminué de 25% le dosage en PC1 par rapport au dosage en PC1 à 22°C afin de réduire la fluidité et améliorer la stabilité. La valeur de l'absorbance a diminué rapidement. Il se confirme que la température et le dosage influencent l'absorbance de la phase liquide de MBE qui contient le PC1.

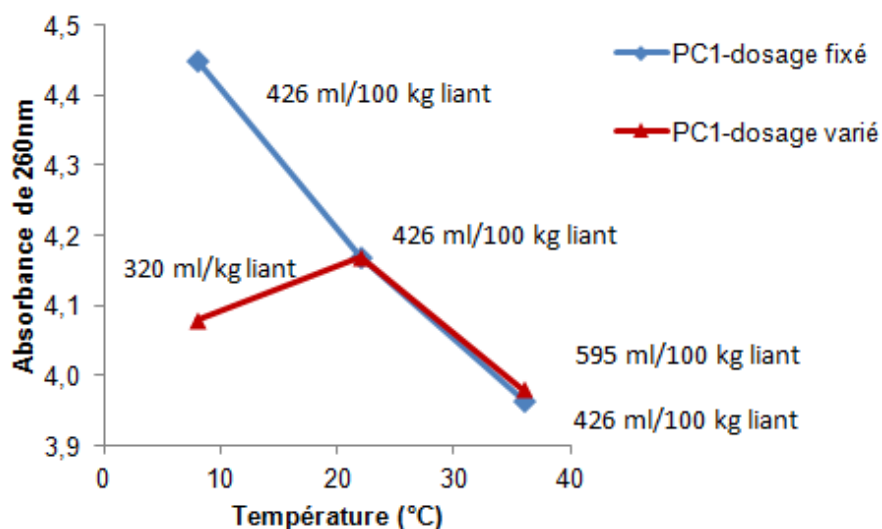


Figure 3.4 : UV/Vis spectroscopie de MBE-B-CV qui contient le PC1 après 40 minutes du contact eau-ciment

3.1.2 Surface spécifique des hydrates

La surface spécifique des hydrates des pâtes (MBE-B-CV sans sable) à différentes températures 40 minutes après le contact eau-ciment est mesurée par la technique BET. Les résultats dans le Tableau 3.1 montrent que la surface spécifique des hydrates augmente avec l'augmentation de la température. Plus la température est élevée, plus l'hydratation s'accélère, ce qui conduit à une augmentation de la surface spécifique des hydrates.

Tableau 3.1 : les surfaces des hydrates des pâtes à différentes températures après 40 minutes du contact eau-ciment

Température (°C)	BET (N ₂) SSA (m ² /g)
8	2,05
22	2,50
36	2,63

3.1.3 Conclusion

L'adsorption de PC sur les grains de ciment et la surface spécifique des hydrates (Ad/SSA) influencent l'efficacité du PC. Alors que celle du PNS est liée directement à l'adsorption par unité de SSA mais elle est difficile à estimer (Hanehara et Yamada, 2008). Deux paramètres importants (Ad et SSA) peuvent être estimés respectivement par l'UV/Vis spectroscopie et le BET. L'absorbance mesurée à 40 minutes après le contact eau et ciment par l'UV/Vis spectroscopie peut montrer une variation de SP% libre dans la phase liquide du MBE, ce qui permet d'estimer la consommation de SP, liée avec l'adsorption de SP par les grains de ciment (Ad). Il y a un effet de la température significatif sur l'absorbance de PC1, mais l'effet de la température sur celui du PNS n'est pas clair. À 8°C, l'absorbance de PC1 est plus grande, donc le PC1 libre dans la phase liquide du MBE est plus grand, c'est-à-dire qu'il y a moins de consommation de PC1 avant la mesure. Le PC1 libre dans la phase liquide diminue avec la température du MBE. Par contre, l'absorbance de PNS mesurée est très faible à toutes les températures car le PNS peut être entièrement consommé. La surface spécifique des hydrates (SSA) mesurée par le BET augmente avec l'augmentation de la température.

3.2 Effet de la température sur la performance des MBE-B, MBE-P et du BAP-B (sans AEA)

3.2.1 Fluidité initiale pour la demande en PC1 fixée

La fluidité initiale est caractérisée par l'étalement initial du BAP ou MBE correspondant juste après le malaxage du mélange cimentaire. Il a été montré que la température élevée diminue la fluidité du mélange cimentaire (Ghafoori et Diawara, 2010 ; Nehdi et Martini, 2010). La Figure 3.5 confirme ce phénomène sur le MBE-B-CV contenant du PC1. À 22°C, le MBE-B est stable et son étalement égal à 260 mm. À 8°C avec même dosage en PC1 et en VEA, l'étalement est amélioré par la diminution de la température, et atteint 320 mm. Le MBE à 8°C entraîne de la ségrégation à cause de son étalement excessif. À 36°C avec le même dosage en PC1 et en VEA, ce MBE est stable mais son étalement a diminué jusqu'à 180 mm à cause de la température élevée, cette étalement n'est plus satisfaisant pour un MBE-B.

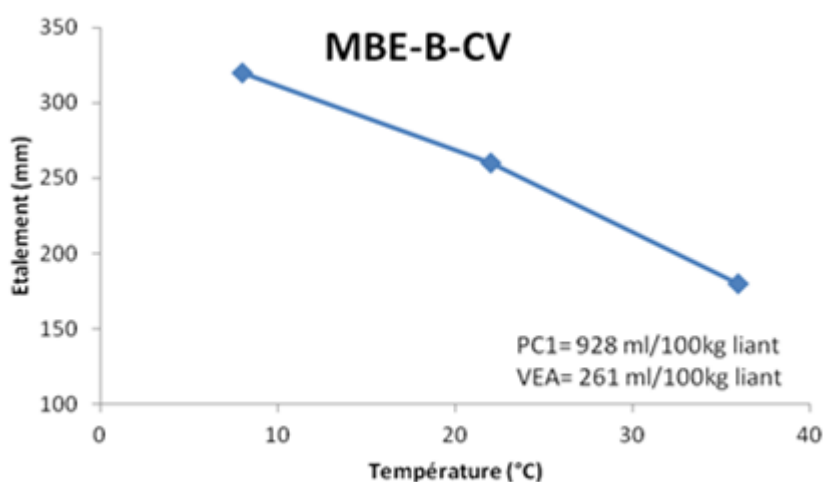


Figure 3.5 : Etalement de MBE-B avec le PC1 en fonction de la température

L'effet de la température sur la variation de la fluidité de MBE-B avec le PC1 peut s'expliquer par le rapport de l'adsorption de PC sur les grains de ciment (Ad) / la surface spécifique des hydrates (SSA) (Hanehara et Yamada, 2008). Le dosage en PC1 libre dans la phase liquide du MBE est lié à l'adsorption de PC1 sur les grains de ciment. L'effet de température sur la variation de fluidité peut ainsi s'expliquer par le modèle et le rapport du dosage en PC1 libre ($PC1 \text{ libre}$) / SSA (Figure 3.6). La température augmente,

l'absorbance de PC1 montrée par l'UV/Vis spectroscopie diminue, ce qui présente une diminution du dosage en PC1 libre pour s'adsorber sur les grains de ciment. D'ailleurs, l'augmentation de la température cause une augmentation de la surface des hydrates, la cinétique d'hydratation augmente. Par conséquent, le rapport PC1 libre / SSA est faible à la température élevée, conduit à une perte de la fluidité. Par contre, la diminution de la température provoque une augmentation du pourcentage de PC1 libre et réduit la surface des hydrates, ce qui conduit à une amélioration de la fluidité. Quand la fluidité initiale fixée est demandée, la variation de la température va conduire à une variation de la demande en PC1, comme cela sera montré dans les paragraphes ci-après.

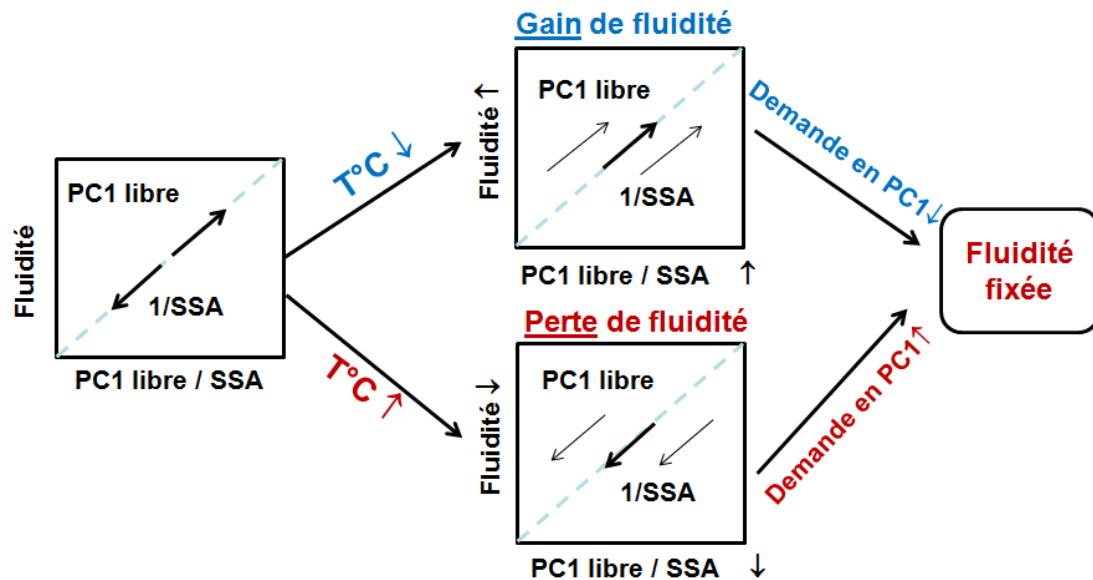


Figure 3.6 : Modèle de l'effet de la température sur la variation de fluidité liée au rapport Ad/SSA

3.2.2 Demande en SP pour la fluidité initiale fixée

L'apparition des bétons autoplaçants (BAP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP) (Bury *et al.*, 2002 ; Aïtcin *et al.*, 2001). Il a été constaté que l'effet de la température réduit ou accroît la fluidité du mortier ou du BAP pour un dosage en SP fixé (Petit *et al.*, 2010 ; Ghafoori et Diawara, 2010). En revanche, la fluidité initiale du MBE-B (260 ± 10 mm) et du BAP-B (660 ± 20 mm) est fixée dans notre projet, la demande en SP varie donc à différentes températures. Cette variation est différente si le type de SP et le type d'ajouts cimentaires incorporés changent.

Si on compare l'effet des deux types de superplastifiant incorporés (PC1 ou PNS) dans le MBE-B (Figure 3.7), le dosage en PNS utilisé afin d'avoir l'étalement désiré est plus grand que celui en PC pour toutes les températures. Le PC1 est plus efficace pour disperser les grains de ciment que le PNS. Par contre, la variation de la demande en PC1 avec la température est plus grande que celle en PNS. La demande en PNS est 1600 et 1200 ml/100 kg de liant respectivement dans le MBE-B-CV et le MBE-B-FC sur l'ensemble des températures. Mais celle en PC1 à 36°C peut augmenter linéairement presque deux fois par rapport à celle à 8°C. À 8°C, la demande en PC1 est 700 et 800 ml/100 kg de liant respectivement dans le MBE-B-CV et le MBE-B-FC. À 36°C, la demande en PC1 augmente à 1300 et 1600 ml/100 kg de liant respectivement. L'absorbance de SP expliquée dans le chapitre précédent montre que le pourcentage de PC1 libre après le malaxage est plus grand et la surface spécifique des hydrates est plus petite à faible température. Le rapport PC1libre/SSA est augmenté à faible température ce qui peut conduire à une amélioration de la fluidité, donc la demande en PC1 est faible afin de garder la même fluidité à température faible. Le PNS qui agit simplement par l'effet électrostatique est très différent du PC1. L'activité des molécules de PNS augmente avec la température qui donne l'effet positif sur la fluidité. Mais en même temps, la surface spécifique des hydrates (SSA) augmente avec la température, ce qui donne un effet négatif sur la fluidité). En conséquence, la demande en PNS ne change quasiment pas avec la température selon ces deux effets opposés.

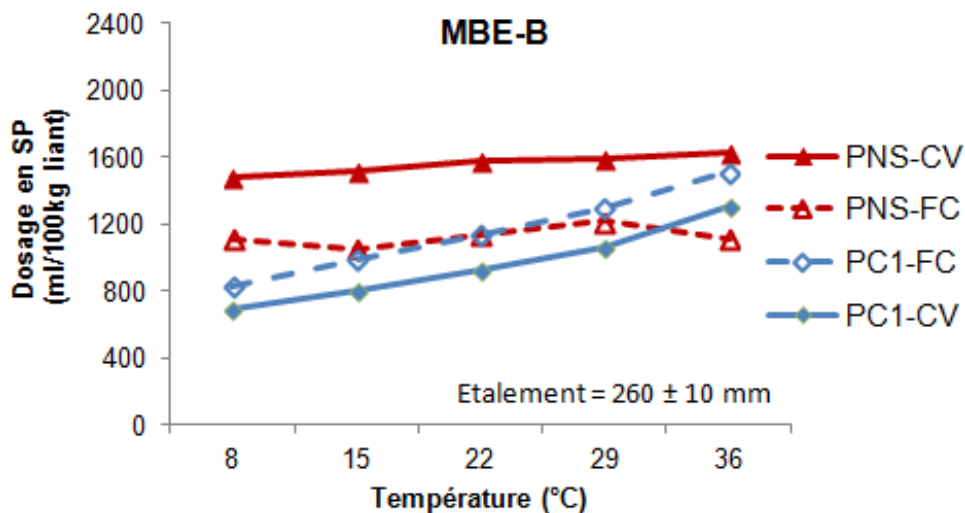


Figure 3.7 : Dosage en SP en fonction de la température pour le MBE-B avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire

Pour la demande en PC2 dans le MBE-P à 8°C, la demande en PC2 est 800 et 1000 ml/100 kg de liant respectivement dans le MBE-P-CV et le MBE-P-FS. A 36°C, la demande en PC2 augmente à 1400 et 1700 ml/100 kg de liant respectivement. La variation de la demande en PC2 dans les MBE-P par l'effet de la température est similaire que celle de la demande en PC1 dans les MBE-B.

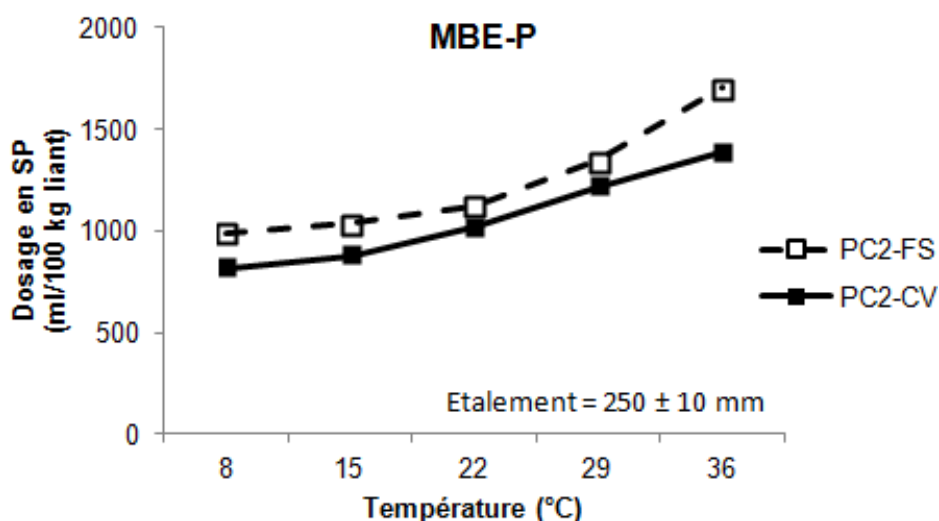


Figure 3.8 : Dosage en SP en fonction de la température pour le MBE-P avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire

L'effet couplé du type d'ajout cimentaire et du type de SP a été évalué dans le MBE-B et le MBE-P (Figure 3.7 et Figure 3.8). Deux types de liant binaire ont été utilisés dans le MBE-B : 25% de cendres volantes (CV) ou 25% de filler calcaire (FC) avec 75% de ciment à usage générale (GU). Le MBE-P contient aussi deux types de liant binaire : 25% de CV avec 75% de GU et 5% de fumée silice (FS) et 95% de GU. Dans la Figure 3.7, on voit que le MBE-B avec le FC a besoin de moins de PNS que le liant avec CV. Alors que le résultat est opposé dans le MBE-B avec le PC1. Le liant avec FC a demandé plus de dosage en PC1 que le liant avec CV. Généralement, une augmentation de la surface Blaine conduit à une diminution du dosage en SP. Dans le MBE-B, la surface Blaine de CV (190-250 m²/kg) est inférieure à celui de FC (362 m²/kg), de ce fait, il y a une diminution de la demande en PNS pour le liant avec FC. Mais le PC produit les couches stériques de l'ordre de quelques nm, les particules fines entre ces couches peuvent encore agir comme un élément d'espacement entre les particules et réduire les forces de Van der Waals entre les particules voisines (Artelt et Garcia, 2008). Si on également compare la granulométrie de CV et de FC dans le MBE-B, il y a plus de fins dans le FC que le CV, en conséquence le liant avec CV améliore la fluidité. En plus, le FC a une attraction considérable pour les molécules de polymère, ces dernières sont adsorbées sur la surface de ses particules. La tendance d'adsorption de PC est plus importante en présence de FC par rapport aux autres ajouts cimentaires (Burgos-Montes et al., 2012). Une partie du PC est adsorbée sur les particules de FC donc finalement, il demande plus de PC dans le MBE-B avec le liant FC pour disperser les grains de ciment et de garder la fluidité initiale. La Figure 3.8 montre

que le dosage en PC2 avec le liant FS est plus grand que celui avec le liant CV dans le MBE-P. L'incorporation de FS dans le mélange cimentaire réduit la fluidité et elle peut absorber une partie de PC (Plank et al., 2009). Par conséquent, la demande en PC2 dans le liant avec FS est plus grande que celle avec le liant CV.

Dans le BAP-B, un seul liant binaire, 25% de CV avec 75% de ciment, a été utilisé. Il a la même tendance que le MBE-B sur l'effet de la température et sur le type de SP utilisé (Figure 3.9).

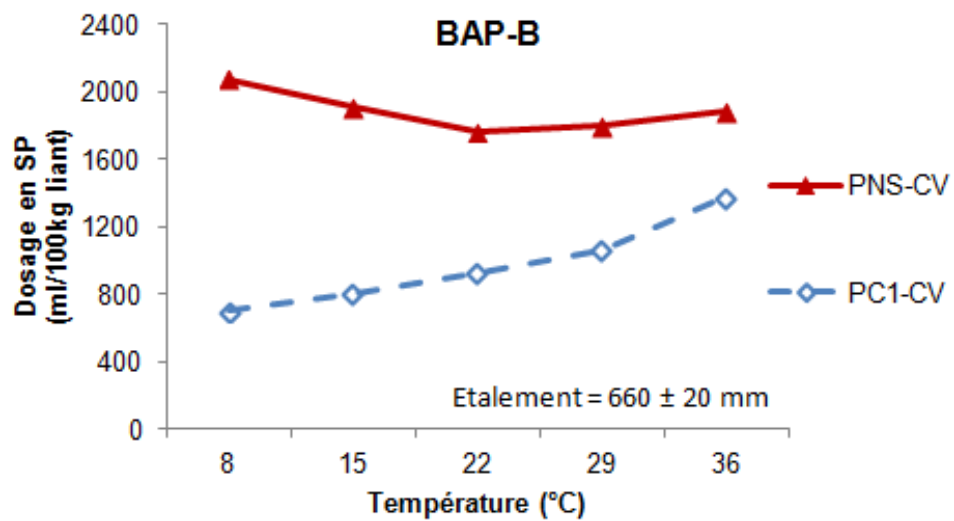


Figure 3.9 : Dosage en SP en fonction de la température pour le BAP-B avec deux types de SP et un seul type d'ajout cimentaire (CV)

3.2.3 Teneur en air

Il n'y a pas d'agent entraîneur d'air (AEA) incorporé dans le MBE-B, le MBE-P et le BAP-B. La variation de la teneur en air dépend donc des différentes températures des mélanges cimentaires. Plus la température du MBE est faible (à 8°C), plus la teneur en air du MBE-B et du MBE-P est grande quels que soient type de SP et la combinaison de liant incorporés (Figure 3.10 et Figure 3.11). En effet, les bulles d'air sont créées par cisaillement lors du malaxage du béton mais, en l'absence d'adjuvant, la plupart de ces bulles éclatent aussitôt. L'augmentation de la température chasse l'air dans l'eau. Il y a une coalescence des petites bulles d'air aux grosses bulles d'air qui peuvent plus facilement être expulsées (moins stables). La poussée hydrostatique tend ensuite à faire remonter les bulles à la surface du béton frais. Par contre, les bulles d'air sont plus difficiles à sortir du mélange cimentaire à faible température (8°C) par rapport à celles dans le MBE à la température élevée. En conséquence, il contient plus d'air à cette température. La solubilité de l'air dans l'eau est réduite avec l'augmentation de la température, car une corrélation existe entre la molécule d'air et l'évaporation d'eau. L'augmentation de la température chasse l'air dans l'eau (Du et Folliard, 2005). Plus la température du béton frais est élevée, plus la teneur en air sera faible et vice-versa (Centre de Recherches Routières, 2002). La tension superficielle d'un liquide diminue avec l'augmentation de la température (Eötvös équation). En diminuant la tension superficielle de l'eau, on diminue l'énergie totale nécessaire pour fractionner les bulles d'air, ce qui conduit à une diminution de la teneur en air.

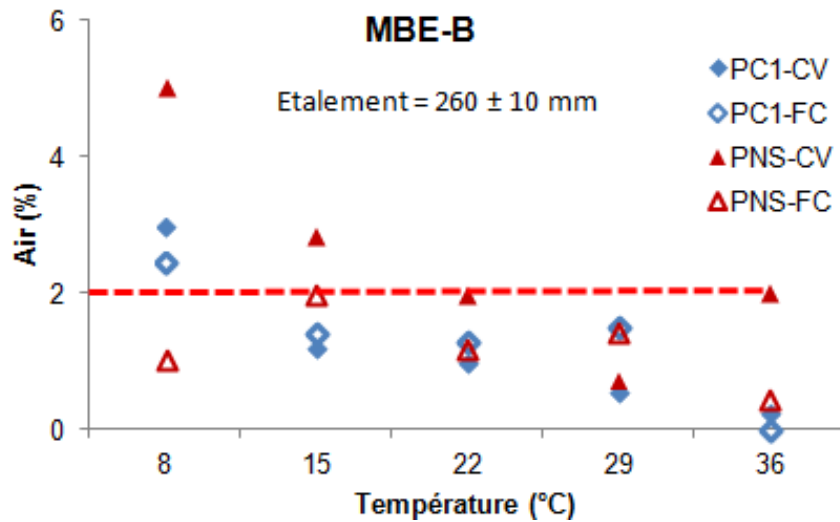


Figure 3.10 : Teneur en air en fonction de la température dans le MBE-B

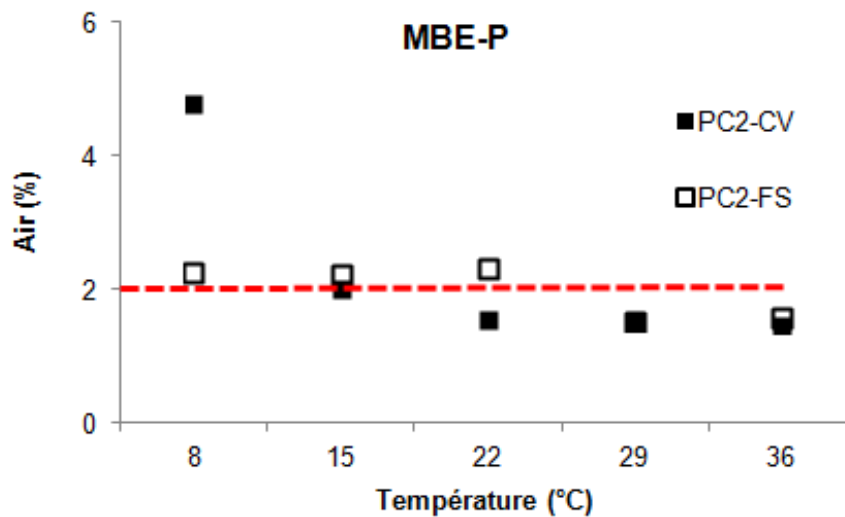


Figure 3.11 : Teneur en air en fonction de la température dans le MBE-P

La variation de la teneur en air à différentes températures par rapport à la teneur en air à 22°C est présentée sur la Figure 3.12 pour les différents types de SP et d'ajout cimentaire dans le MBE. On remarque que c'est plutôt le liant avec CV qui possède la plus grande teneur en air à faible température. Il est plus sensible à l'effet de la température sur la teneur en air. Le FC diminue la teneur en air quelle que soit la température, car les bulles d'air sont moins stables dans le mélange avec le FC. La Figure 3.13 montre la teneur en air à différentes températures de BAP-B avec le liant contenant des CV. L'augmentation de la teneur en air à température faible se retrouve également dans le BAP-B.

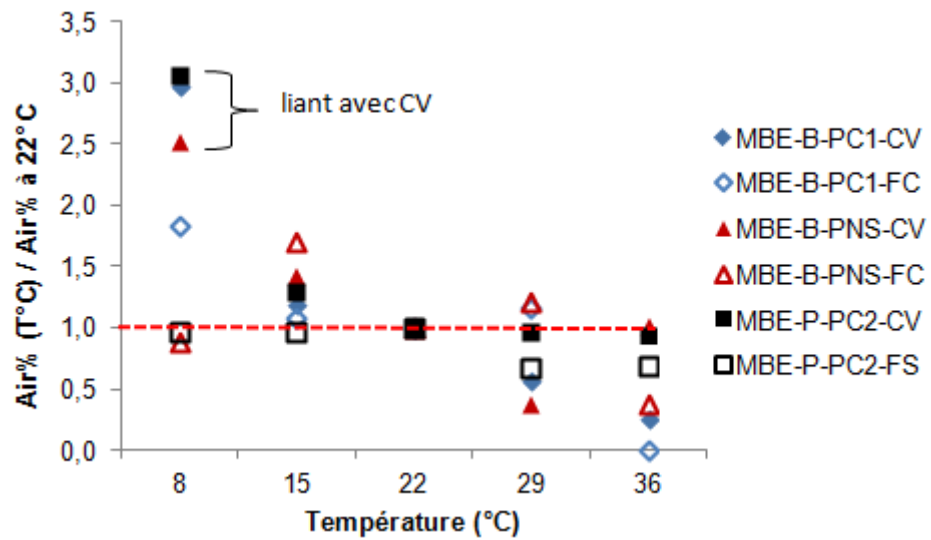


Figure 3.12 : Variation de teneur en air à différentes températures par rapport la teneur en air à 22°C pour le MBE-B et le MBE-P

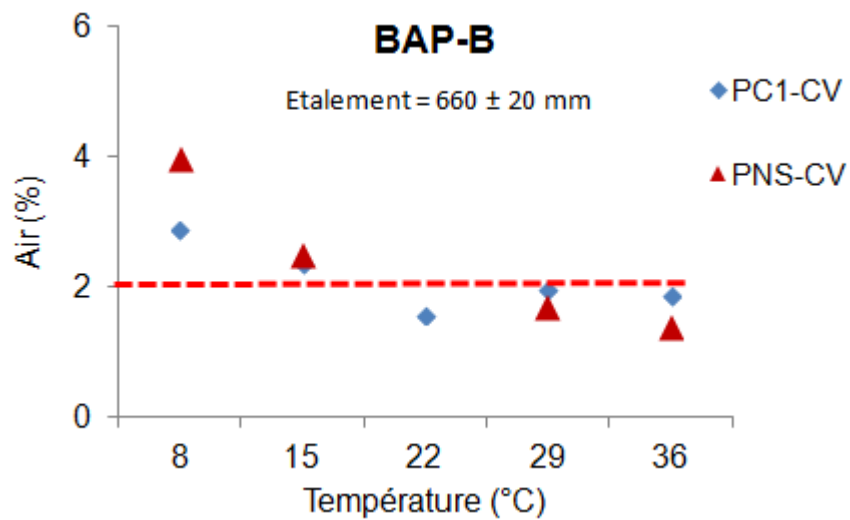


Figure 3.13 : Teneur en air en fonction de la température dans le BAP-B

3.2.4 Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est liée à la fluidité du mélange cimentaire (Wallevik, 2006 ; Saak et al., 2004 ; Roussel et al., 2005). Avec un dosage de SP constant, le seuil de cisaillement varie avec la température (Martini et al., 2009). À la différence des autres recherches sur l'effet de la température sur la rhéologie, notre projet a fixé la fluidité initiale des MBE ou des bétons fluides à rhéologie adaptée pour toutes les températures. Généralement, cette fluidité constante conduit à un seuil de cisaillement quasiment identique, mais dans notre étude, la variation du seuil de cisaillement apparaît légèrement à différentes températures même si la fluidité était fixée.

La demande en PC varie avec la température, ce qui donne un effet couplé « Température-SP » sur la rhéologie. La cinétique d'hydratation augmente avec la température ce qui peut augmenter le seuil de cisaillement. Par contre, la demande en PC augmente avec la température ce qui peut diminuer le seuil de cisaillement. Ces deux effets de la température opposés qui jouent un rôle prépondérant décide la valeur du seuil de cisaillement (Figure 3.14 et Figure 3.16). La demande en PNS ne varie quasiment pas avec la température, l'effet du dosage en PNS sur le seuil de cisaillement est négligeable, mais l'activité du PNS augmente avec la température ce qui peut diminuer le seuil de cisaillement. L'effet de la température sur l'activité du PNS joue un rôle plus important que celui sur la cinétique d'hydratation. Donc le seuil de cisaillement diminue avec la température dans le MBE avec le PNS (Figure 3.15). La variation du seuil de cisaillement à différentes températures pour une fluidité fixée est différente selon le type de SP utilisé et le type de MBE, mais il y a très peu d'influence du type d'ajout cimentaire incorporé. Il apparaît un seuil de cisaillement minimum pour la température ambiante (22°C) quel que soit l'ajout cimentaire incorporé pour les mortiers testés. Les seuils de cisaillement du MBE-B avec le PC1 sont quasiment identiques. Alors pour le MBE-B avec le PNS, le seuil de cisaillement est plus grand dans le mélange inférieur à 22°C. Quand la température est supérieure à 22°C, le seuil de cisaillement est plus ou moins identique. Par contre, le seuil de cisaillement est plus grand à température élevée pour le MBE-P avec le PC2. Dans le BAP-B contenant des CV (Figure 3.17), on trouve un plus petit seuil de cisaillement à la température de 22°C. À température élevée du BAP étudié, le seuil de cisaillement augmente légèrement.

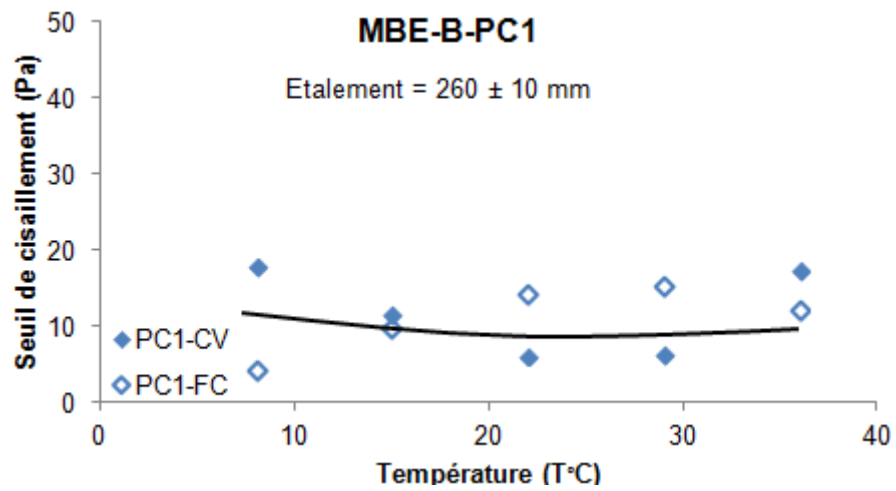


Figure 3.14 : Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-B avec le PC1

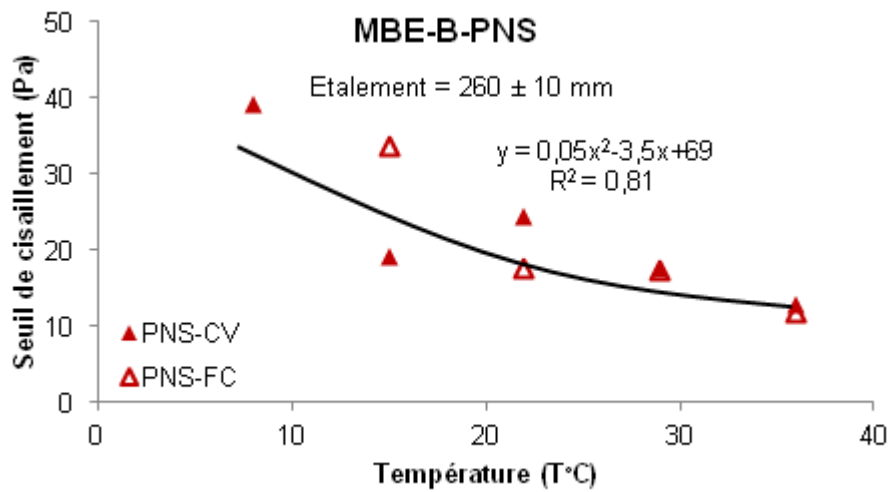


Figure 3.15 : Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-B avec le PNS

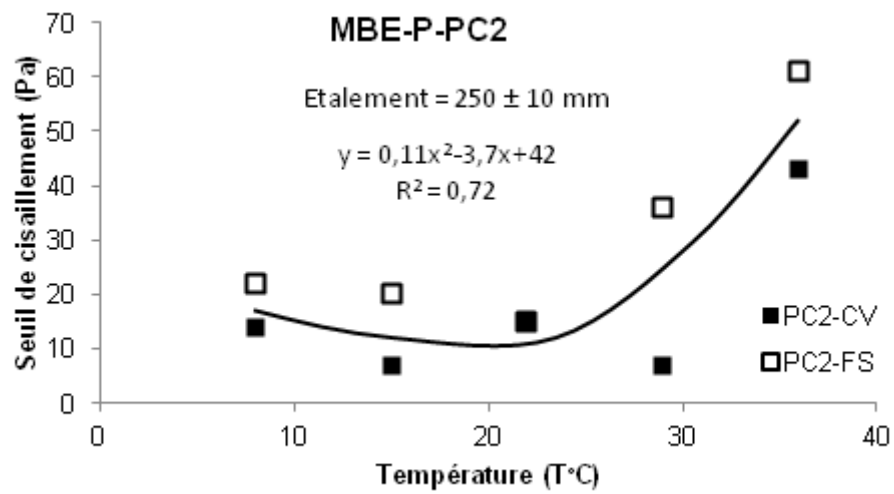


Figure 3.16 : Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-P avec le PC2

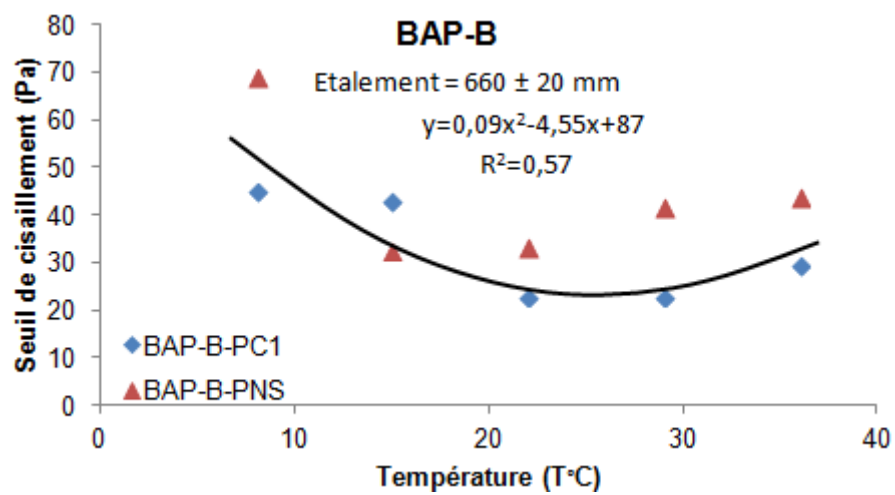


Figure 3.17 : Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le BAP-B avec le PC1 et le PNS

3.2.4 Viscosité plastique

Les viscosités plastiques du MBE-B, du MBE-P et du BAP-B contenant différents types de SP et d'ajouts cimentaires sont variables à 22°C, même si les fluidités sont quasiment identiques (Tableau 3.2). La variation de la viscosité plastique à différentes températures est différente selon le type de SP utilisé et le type de MBE.

Tableau 3.2 : Viscosité plastique (Pa.s) des MBE-B, MBE-P et du BAP-B à 22°C

MBE-B-CV		MBE-B-FC		MBE-P-PC2		BAP-B-CV	
PC1	PNS	PC1	PNS	CV	FS	PC1	PNS
3,8	3,7	2,8	4,4	6,2	4,8	7,4	9,8

En comparant la viscosité plastique du MBE et BAP étudié à différentes températures et à celle à 22°C, on remarque que l'effet de la température sur la viscosité plastique est désordonné. Il y a très peu de variation de la viscosité plastique en fonction de la température. Cette variation est plus ou moins 50% par rapport celle à 22°C. (Figure 3.18, Figure 3.19 et Figure 3.20).

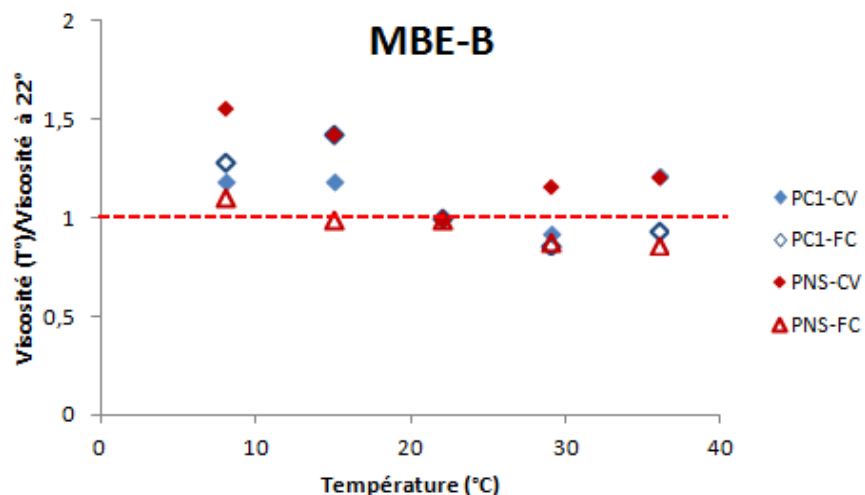


Figure 3.18 : Variation de la viscosité plastique à différentes températures à celle à 22°C dans le MBE-B

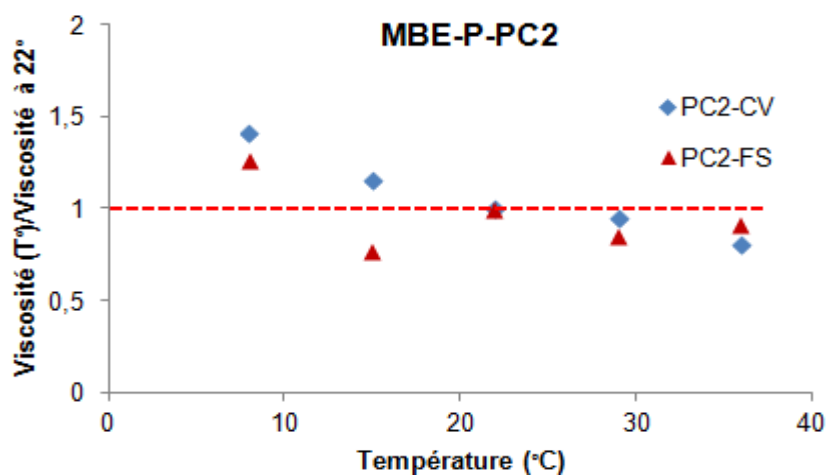


Figure 3.19 : Variation de la viscosité plastique à différentes températures à celle à 22°C dans le MBE-P-PC2 contenant des CV ou des FS

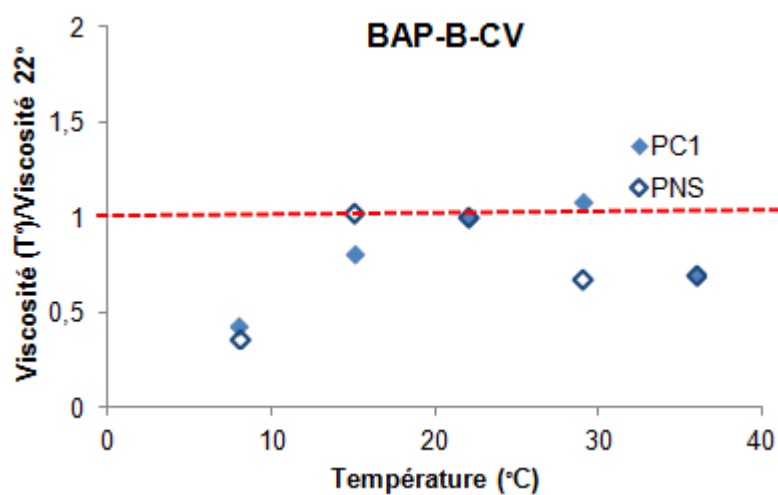


Figure 3.20 : Variation de la viscosité plastique à différentes températures à celle à 22°C dans le BAP-B contenant des CV

3.2.6 Flux de chaleur

Le mortier ou le béton frais est coulé dans un moule de 15 cm * 15 cm en carton de faible épaisseur (3 cm pour le mortier et 6 cm pour le béton) et placé dans un porte échantillon (Wirquin et al., 2008). Cette dernière comporte quatre faces isolantes en polystyrène. Les deux bases isothermes du calorimètre sont constituées de deux échangeurs plans. Les échangeurs sont reliés à un bain thermostaté à l'aide de deux pompes qui assurent la circulation du fluide caloporteur. Les températures sont mesurées par des thermocouples de type K inclus dans les capteurs de flux et par un thermocouple disposé au cœur du béton. Ceci nous permet de vérifier la qualité des conditions isothermes. Afin de pouvoir comparer les essais réalisés sur les MBE et sur les BAP, le flux et le dégagement de chaleur ont été calculés par gramme de ciment.

Les résultats obtenus montrent que le flux et le dégagement de chaleur dans le temps sont plus grands à forte température, quels que soient le type de SP, d'ajout cimentaire, de mortier ou de béton.

Le premier pic de flux apparaît immédiatement après le contact eau-ciment. Le deuxième pic (hydratation du C_3S) apparaît généralement après quelques heures. Pendant la période de ralentissement, l'ettringite se dissout et se combine avec l'alumine et le calcium du C_3A pour former du monosulfoaluminate de calcium (Afm). Cette réaction correspond sur la courbe de flux de chaleur à la partie bosselée. Cette dernière s'appelle aussi le troisième pic de flux (hydratation du C_3A). Notre étude confirme que : plus la température est élevée, plus l'hydratation est accélérée, plus tôt le deuxième pic apparaît et plus court est l'intervalle entre le deuxième pic et le troisième pic. En effet, l'augmentation de la température accélère la dissolution d'ettringite et libère le sulfate dans la solution, donc accroît la quantité de sulfate attaché sur le CSH (Barbarulo et al., 2004). Une température faible retarde l'hydratation. La forme du flux dans le temps pour le mortier (MBE-B et MBE-P) avec les différents types de SP mais avec le même type d'ajout cimentaire (CV) est quasiment identique (Figure 3.21, Figure 3.22 et Figure 3.23).

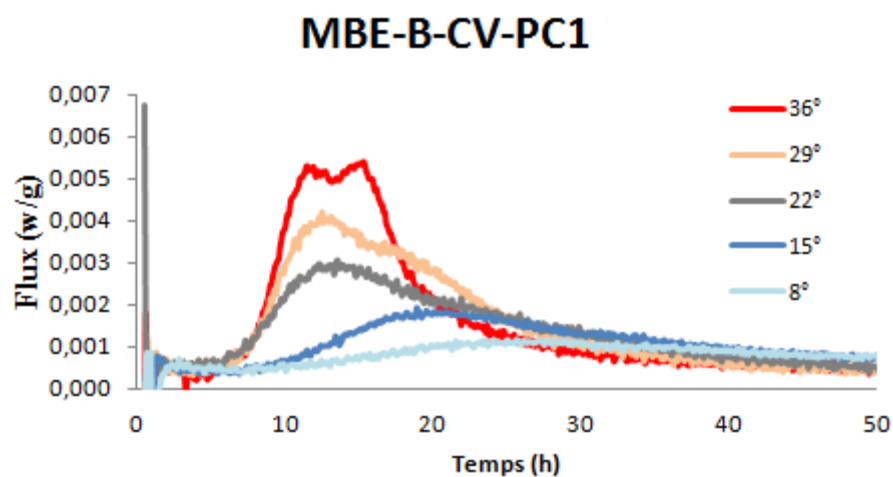


Figure 3.21 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-B contenant des CV avec le PC1

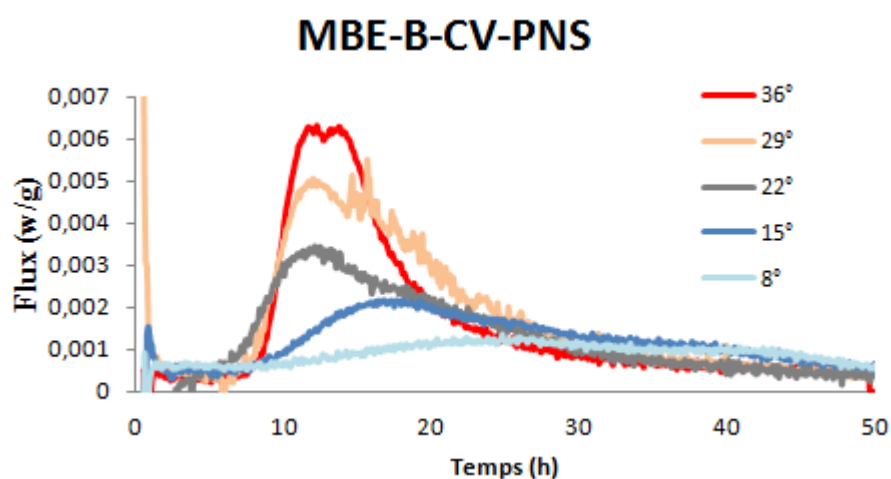


Figure 3.22 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-B contenant des CV avec le PNS

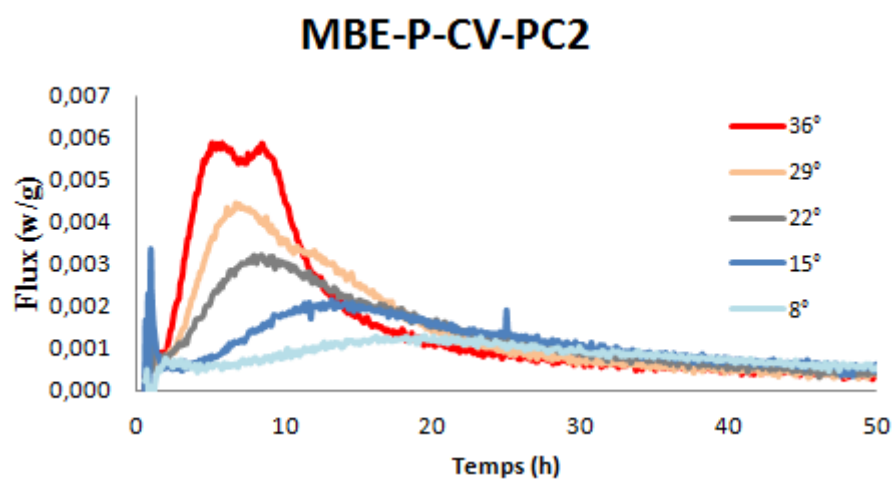


Figure 3.23 : Flux de chaleur en fonction de temps selon les différentes températures de MBE-P contenant des CV avec le PC2

Le type de SP utilisé ne fait pas varier la forme du flux. Mais c'est plutôt la température et le type de mortier (E/L différent) qui accélère ou retarde le pic secondaire de flux. La forme du flux varie selon le type d'ajout cimentaire utilisé dans le mortier. Pour le MBE-B et le MBE-P contenant des CV, la valeur de troisième pic de flux est plus faible que celle de deuxième pic. Plus la température est réduite, plus le troisième pic apparaît faible. Tandis que le troisième pic est plus grand que le deuxième pic pour le MBE-B contenant des FC et le MBE-P contenant des FS à toutes les températures (Figure 3.24, Figure 3.25 et Figure 3.26). Plus la température diminue, plus le troisième pic apparaît faible. Parce que le FC incorporé dans les MBE peut donner la calcite (CaCO_3), qui réagit avec C_3A au cours de l'hydratation et crée le Afm. D'ailleurs, le FC contient 0,06% de SO_3 qui est beaucoup plus faible que celui dans le CV (1,36%).

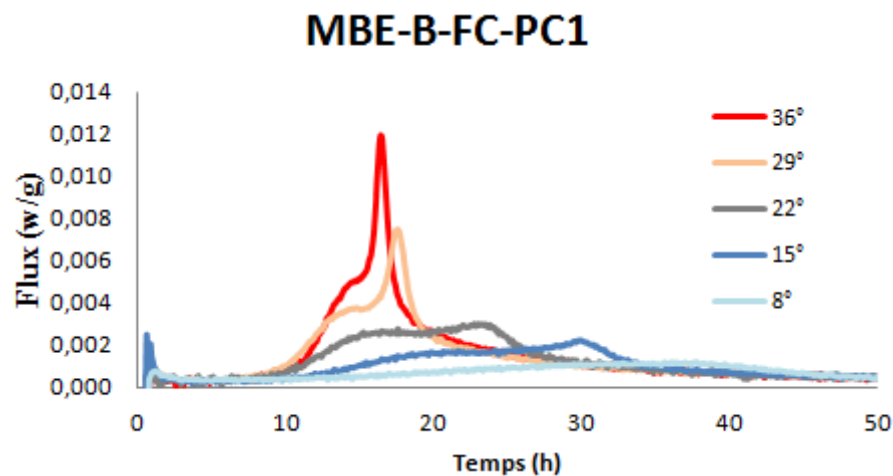


Figure 3.24 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-B contenant le FC avec le PC1

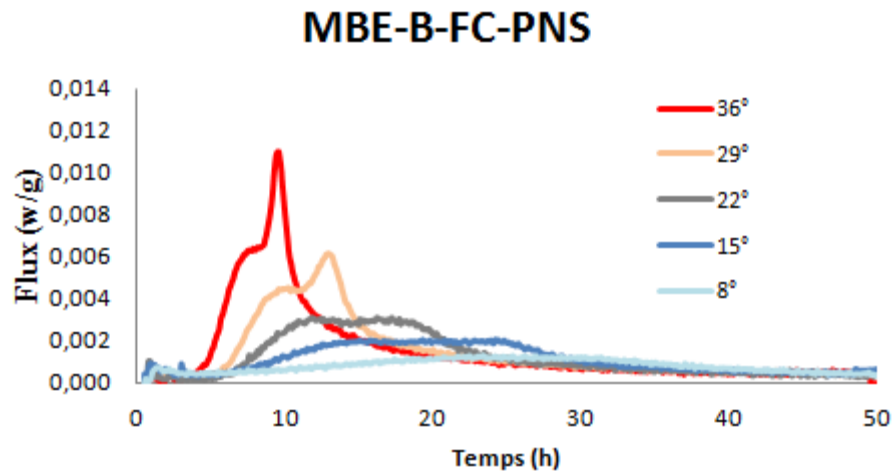


Figure 3.25 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-B contenant le FC avec le PNS

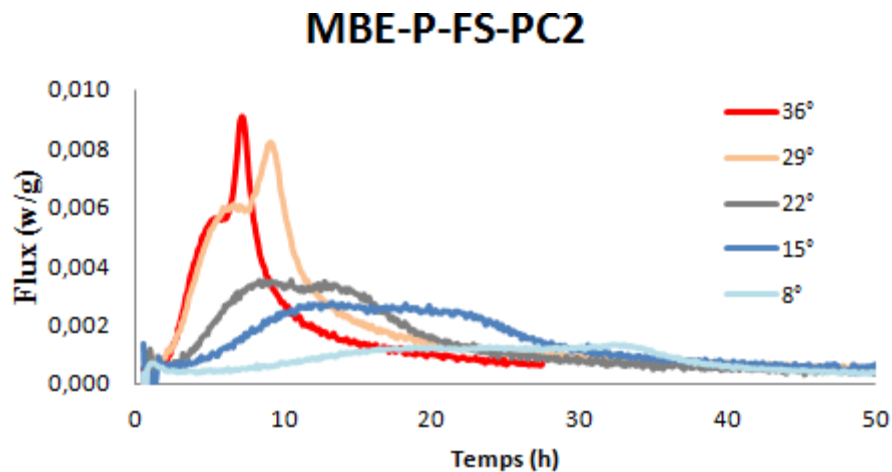


Figure 3.26 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de MBE-P contenant la FS avec le PC2

En comparant le flux du MBE-B (Figure 3.21 et Figure 3.22) et celui du BAP-B (Figures 3.27 et Figure 3.28) contenant le même type d'ajout cimentaire (CV) à différentes températures, la forme de flux et la valeur maximale de flux pour le mortier et le béton sont similaires.

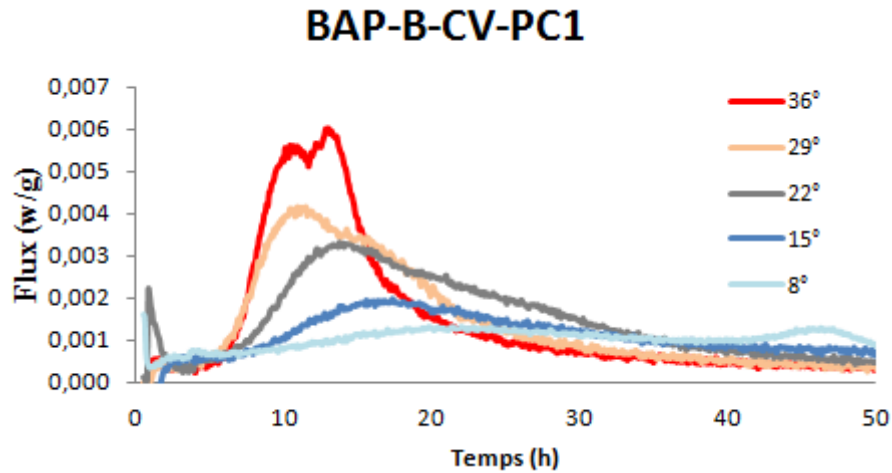


Figure 3.27 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de BAP-B contenant des CV avec le PC1

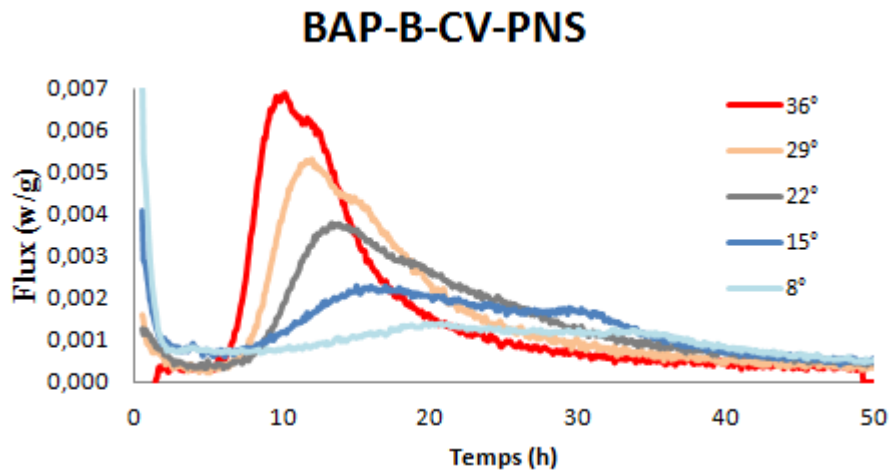


Figure 3.28 : Flux de chaleur en fonction du temps selon les différentes températures de BAP-B contenant des CV avec le PNS

À une température fixée (22°C) et un type d'ajout cimentaire (CV) fixé, il n'y a presque pas de variation entre le MBE-B et le BAP-B avec différents types de SP (PC1 ou PNS) sur le flux et sur le dégagement de chaleur (Figure 3.29 et Figure 3.30). Les variations de flux et de dégagement de chaleur sont influencées par la température, par le type d'ajout cimentaire utilisé et par la formulation du mélange. Suite à l'étude de la comparaison du flux et du dégagement de chaleur sur béton conventionnel et les MBE correspondants à différentes températures (Wirquin et al., 2008), notre étude montre que la méthode MBE peut également prédire le dégagement de chaleur et le flux des BAP à différentes températures.

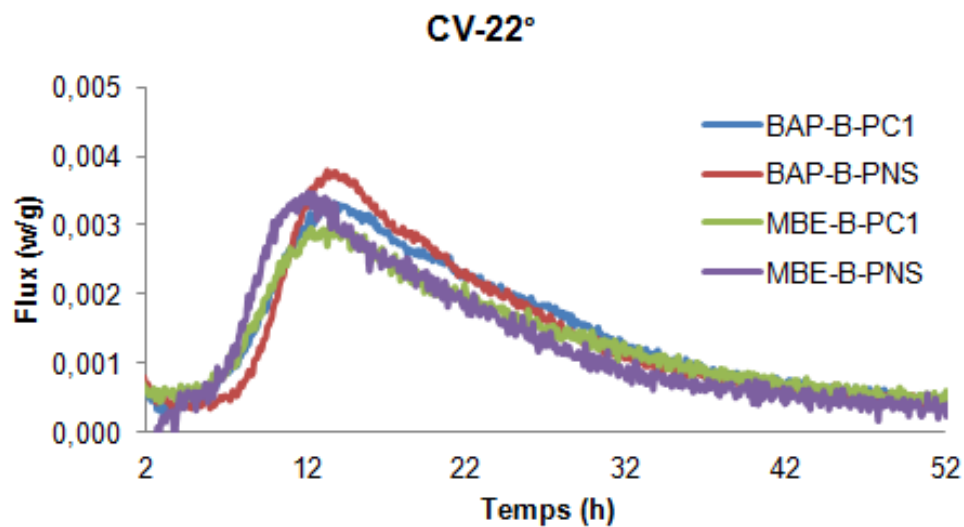


Figure 3.29 : Comparaison du flux de chaleur mesuré sur le MBE-B et le BAP-B contenant des CV et deux types de SP à 22°C

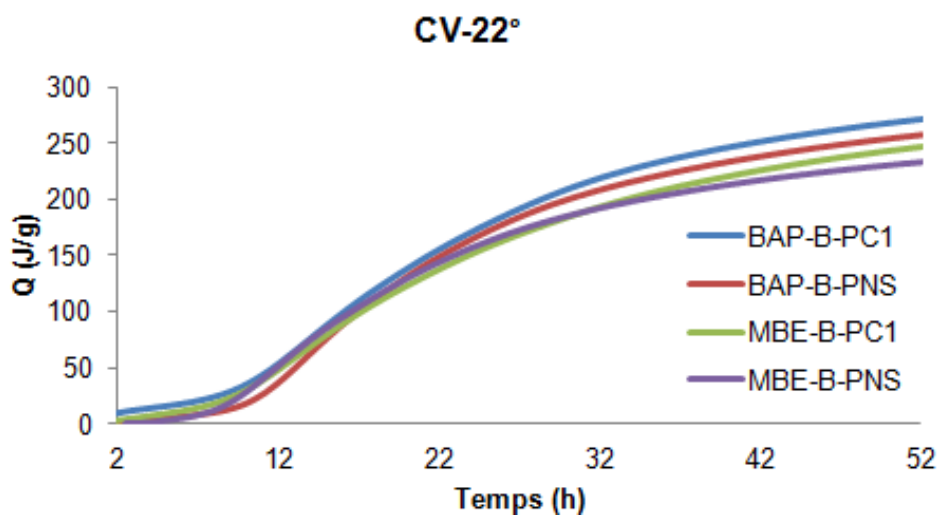


Figure 3.30: Comparaison la quantité de chaleur dégagée mesurée sur le MBE-B et le BAP-B contenant des CV et deux types de SP à 22°C

3.2.7 Début de prise

Le début de prise correspond au temps de la fin de la période dormante. Ce temps correspond à la perte de linéarité sur la courbe du flux, c'est à dire au passage d'un flux constant à un flux évolutif (Petit, 2005). L'influence de la température sur le début de prise est évidente. Plus la température du mélange cimentaire est faible, plus le début de prise est long. Ce phénomène est dû au retard de l'hydratation à faible température, et apparaît pour tous les types de MBE et de BAP (Figure 3.31, Figure 3.32 et Figure 3.33). La variation du début de prise est plus grande aux températures faibles (8 et 15°C). À partir de 22°C, le début de prise diminue moins rapidement avec la température du mélange.

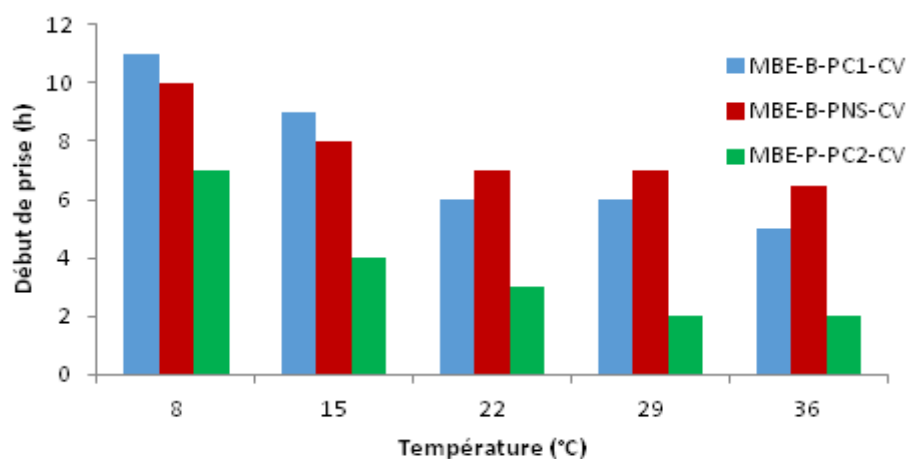


Figure 3.31 : Début de prise du MBE-B et du MBE-P contenant des CV en fonction de la température avec différents types de SP

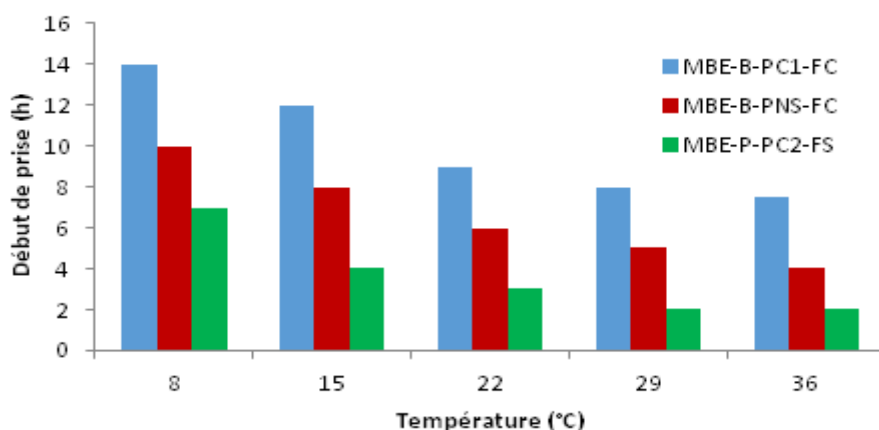


Figure 3.32 : Début de prise du MBE-B et du MBE-P contenant du FC ou de la FS en fonction de la température avec différents types de SP

Le début de prise du béton a été mesuré uniquement sur le BAP-B contenant des CV avec deux types de SP (PC1 ou PNS) (Figure 3.33). Le début de prise diminue avec la température comme le MBE-B. En outre, le début de prise de BAP-B-CV avec le PC1 est plus petit que celui avec le PNS qui correspond bien aux résultats sur MBE-B ($> 22^{\circ}\text{C}$). La Figure 3.34 montre la corrélation entre le début de prise de BAP-B et celle du MBE-B. Cette corrélation est linéaire entre le mortier et le béton. Entre 8 et 36°C , le début de prise du MBE-B et celui du BAP-B est quasiment identique.

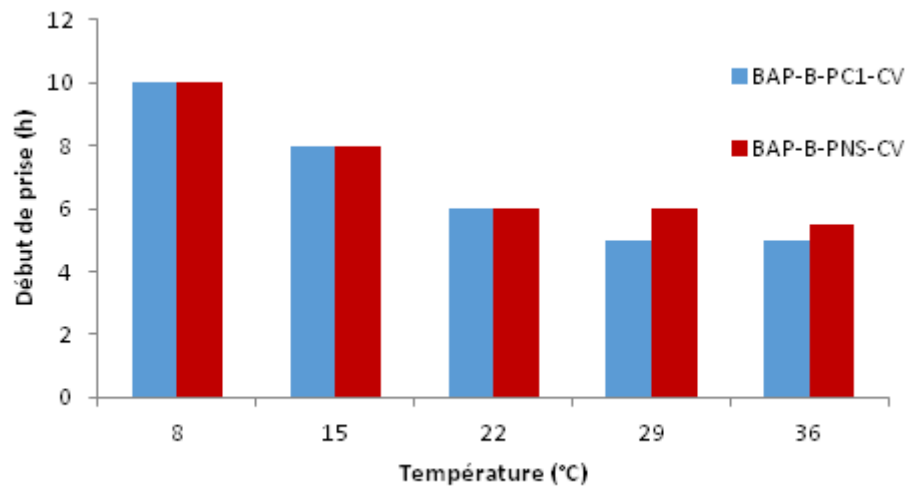


Figure 3.33 : Début de prise du béton (BAP-B) contenant des CV en fonction de la température avec différents types de SP

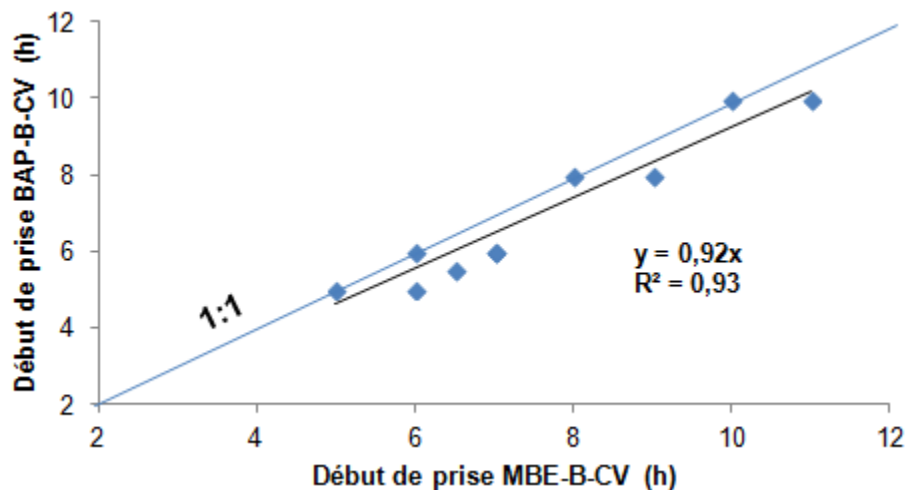


Figure 3.34 : Corrélation du début de prise du BAP-B en fonction de celui du MBE-B

3.2.8 Résistance en compression

3.2.8.1 À court terme

Les températures des MBE-B, MBE-P et BAP-B sont de 8, 15, 22, 29 et 36°C lors du malaxage, de la mise en place et de la cure des échantillons jusqu'aux tests de la résistance en compression à court terme (ici à 1 et 7 jours).

La résistance en compression à court terme est liée avec les résultats de cinétique d'hydratation, donc on voit bien qu'elle augmente linéairement avec la température. Le phénomène apparait pour les formules de MBE-B, MBE-P et BAP-B avec les différents types de SP et d'ajout cimentaire (Figure 3.35, Figure 3.36 et Figure 3.37). La température a pour effet d'accélérer significativement l'hydratation du ciment : la consommation plus rapide des grains de ciment génère du C-S-H et de la portlandite en quantités importantes dès les premières heures de la cure, ce qui induit un développement de résistance plus rapide. De la même manière, les sources de sulfates sont épuisées plus rapidement et les phases aluminates type Afm sont observées aux jeunes âges lorsque la température augmente (Gallucci et al., 2006). La variation de f'_c à différentes températures est plus grande à 1 jour que celle à 7 jours.

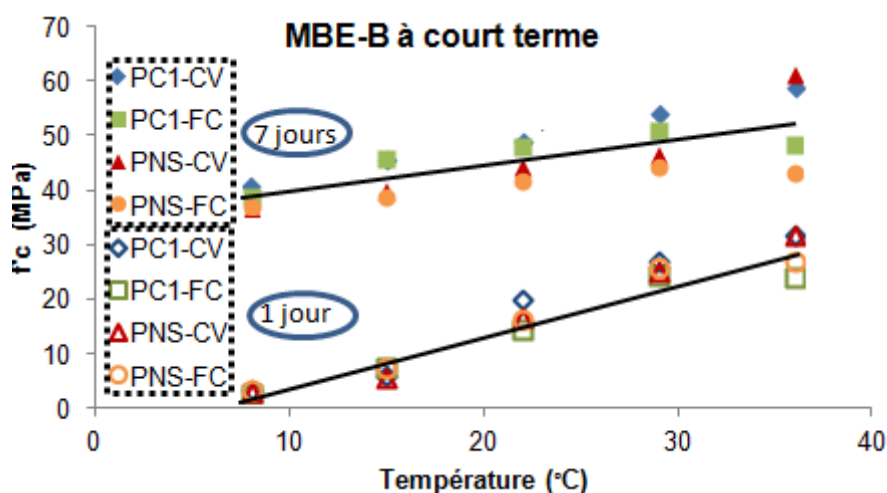


Figure 3.35 : Résistance en compression à court terme de MBE-B en fonction de la température avec différents types de SP et d'ajout cimentaire

Dans la Figure 3.35 le type de SP pour le MBE-B, le dosage en SP et le type d'ajout cimentaire (25% de remplacement fixé) n'influence pas la f'_c à court terme. Avec l'augmentation de la température de 8 à 36°C, la valeur de f'_c à 1 jour varie de moins de 80% à plus de 60% par rapport à f'_c à 22°C. Pour la f'_c à 7 jours, cette gamme de variation se situe entre moins de 20% à plus de 20%.

Dans la Figure 3.36 pour le MBE-P, un seul type de SP est utilisé (PC2). Deux types d'ajout cimentaire avec différents remplacements, soit avec 5% de remplacement de FS, soit avec 25% remplacement de CV sont étudiés. La f'_c à court terme est influencée par la température mais aussi par le pourcentage de remplacement d'ajout cimentaire. La f'_c de MBE-P avec 5% de remplacement de FS + 95% de ciment est toujours plus importante que celle avec 25% de CV + 75% Ciment. Car l'augmentation du pourcentage de ciment améliore la résistance en compression à court terme. La valeur de f'_c à 1 jour varie avec la température de moins de 70% à plus de 30% par rapport à la f'_c à 22°C. Cette variation à 7 jours est plus petite, la valeur de f'_c étant de moins de 15% à plus de 5% par rapport à la f'_c à 22°C.

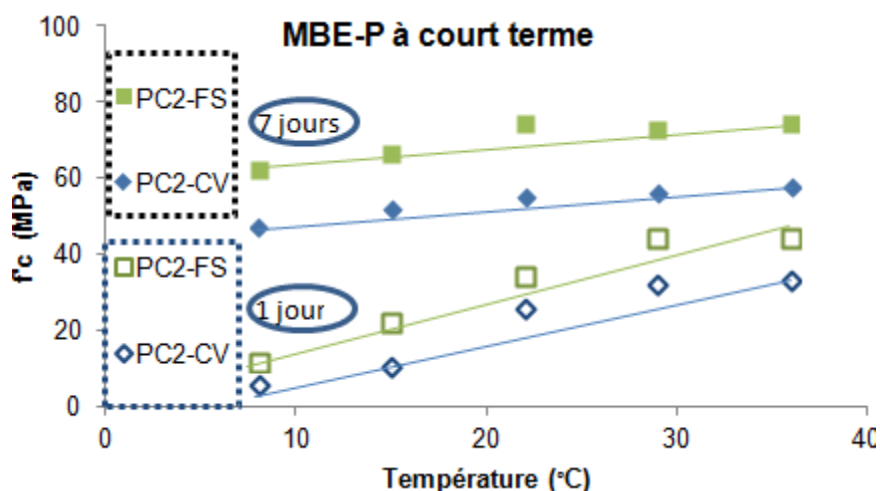


Figure 3.36 : Résistance en compression à court terme du MBE-P en fonction de la température avec différents types d'ajout cimentaire

L'effet de la température sur la résistance en compression à court terme du BAP-B est linéaire. Plus la température est élevée, plus la résistance est grande (Figure 3.38). Il y a une bonne corrélation entre le MBE-B et le BAP-B pour la f'_c à 1 jour. Cette corrélation est parfaitement linéaire. La valeur de f'_c pour le BAP-B augmente aussi selon la température (Figure 3.38). La valeur de la résistance à 1 jour du MBE-B est identique (entre 8 à 22°C) ou plus grande que celle de BAP-B (29 et 36°C).

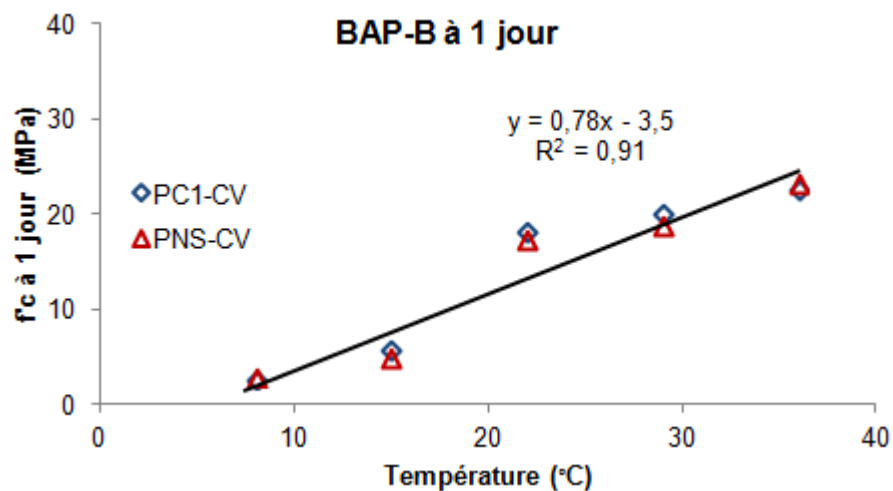


Figure 3.37 : Résistance en compression à 1 jour du BAP-B contenant des CV en fonction de la température avec différents types de SP

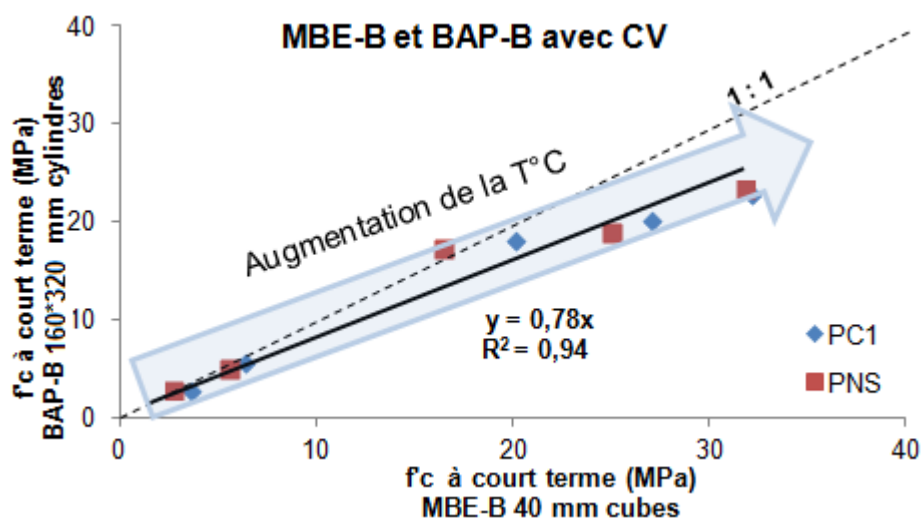


Figure 3.38 : Corrélation de la résistance en compression à 1 jour du BAP-B-CV en fonction de celle du MBE-B-CV

3.2.8.2 À long terme

Les échantillons pour les tests de résistance à long terme (ici 28 et 56 jours) ont été coulés et mûris aux températures de cure initiale, puis après démoulage ils ont été conservés dans la salle à 100% HR et 22°C jusqu'à échéance. Généralement, la résistance en compression à long terme diminue quand la température de murissement est élevée (Kosmatka et al., 2004). Dans notre cas, à par la température de cure initiale, les éprouvettes ont ensuite été conservée à 22°C pour les essais à long terme. La résistance en compression à long terme n'a donc pas varié significativement (Figure 3.39 à Figure 3.42). La variation de la résistance en compression à différentes températures du MBE est inférieure à 10%. La résistance en compression à long terme est différente selon la formulation de MBE du fait de en différence de compactibilité et du dosage en ajout cimentaire remplacé.

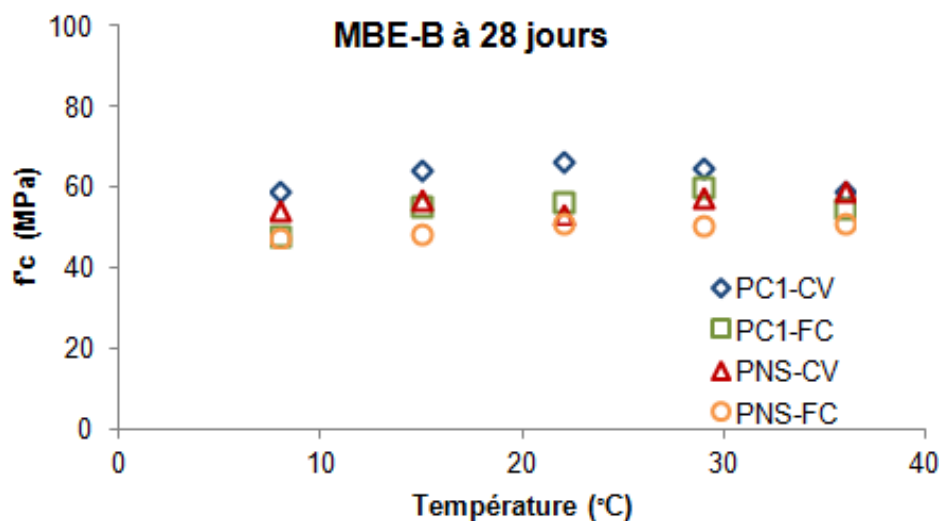


Figure 3.39 : Résistance en compression à 28 jours du MBE-B en fonction de la température de mélange initiale

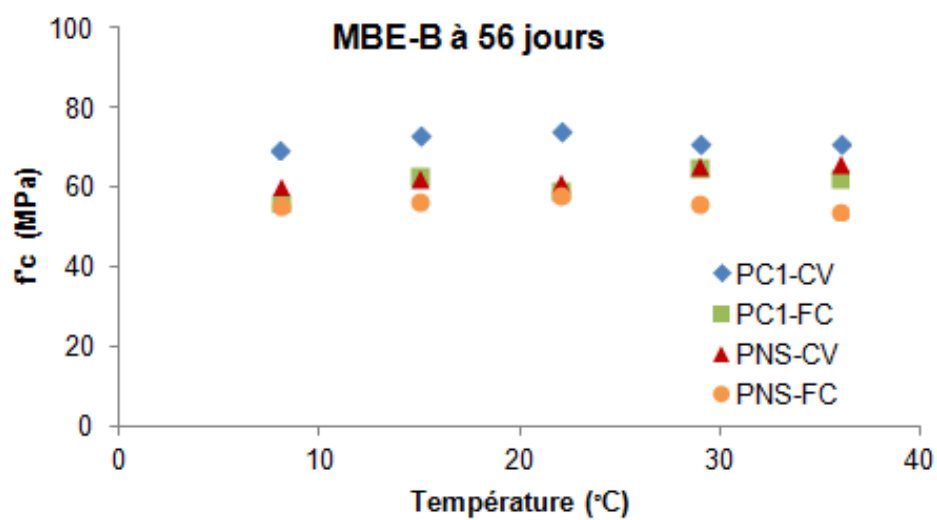


Figure 3.40 : Résistance en compression à 56 jours du MBE-B en fonction de la température de mélange initiale

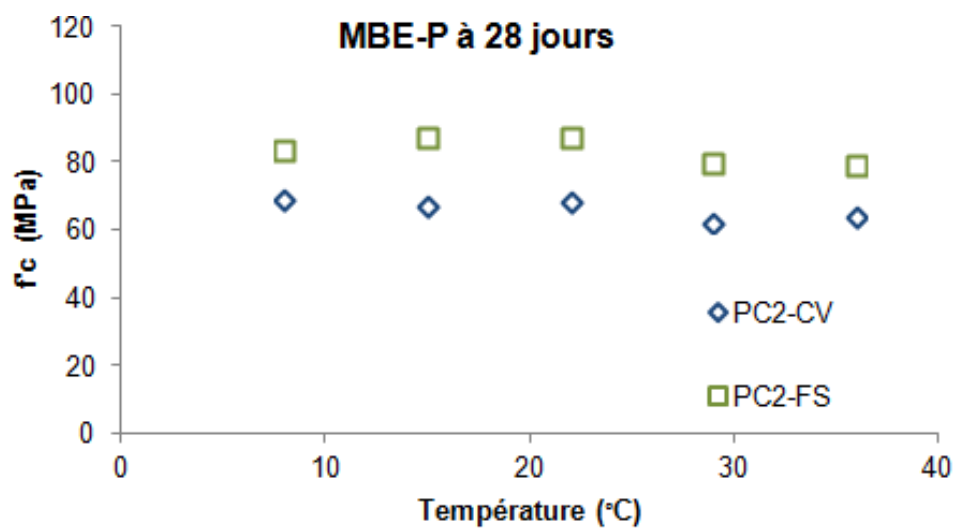


Figure 3.41 : Résistance en compression à 28 jours du MBE-P en fonction de la température de mélange initiale

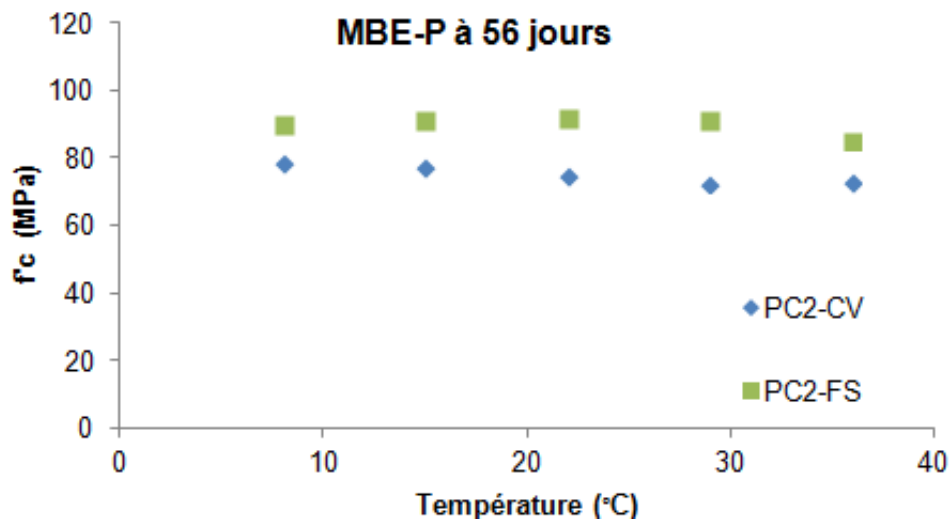


Figure 3.42 : Résistance en compression à 56 jours du MBE-P en fonction de la température de mélange initiale

Le même phénomène existe dans le BAP-B (Figure 3.43). Il y a très peu de variation sur la résistance en compression à 28 jours en fonction de la température dans le BAP-B contenant des CV.

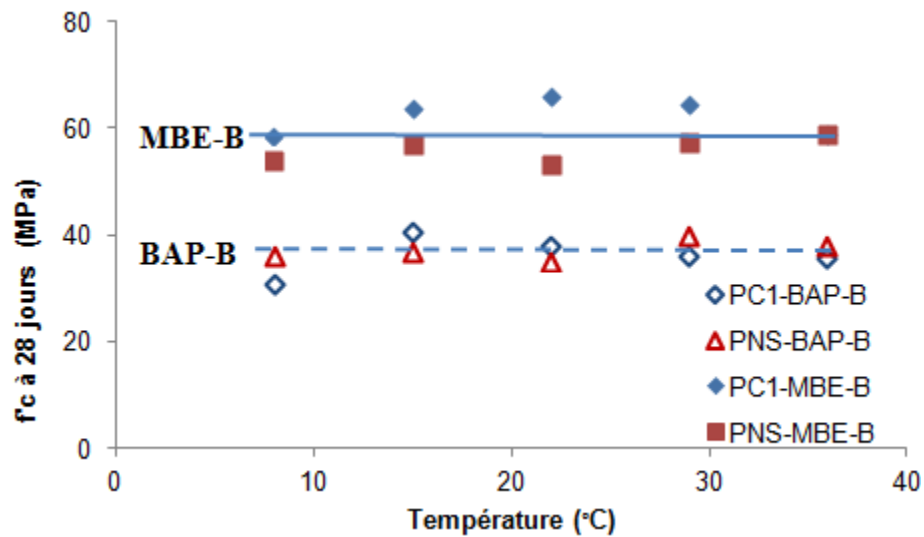


Figure 3.43 : Comparaison entre la résistance en compression à 28 jours du MBE-B et BAP-B contenant des CV en fonction de la température de mélange initiale

3.3 Effet de la température sur la performance du MBE-I et du BSAP-I (avec AEA)

3.3.1 Demande en SP pour la fluidité initiale fixée

La fluidité initiale de MBE-I (250 ± 10 mm) et de BSAP-I (500 ± 50 mm) a été fixée dans notre projet. La demande en SP doit donc varier à différentes températures comme cela a déjà été montré précédemment pour le MBE-B et BAP-B. Les mêmes types de SP utilisés dans le MBE-B et le BAP-B, PC1 et PNS, ont été utilisés également dans le MBE-I et BSAP-I. Mais les liants étudiés pour ces mortiers ou bétons étaient ternaires, spéciaux pour l'infrastructure : 25% de cendres volantes (CV) + 75% de ciment ou 25% de laitier (LT) + 5% fumée silice (FS) + 70% de ciment.

Dans la Figure 3.44, on trouve que la demande en PNS pour le MBE-I est plus grande que la demande en PC1. Le PC1 est plus efficace pour disperser les grains de ciment que le PNS. La demande en PC1 de MBE-I augmente avec la température. Elle varie de 400 à 600 ml/100 kg de liant à la température de 8 à 36°C. En effet, l'absorbance de SP expliqué dans le chapitre précédant montre que le pourcentage de PC1 libre après malaxage est plus grand à faible température et la surface spécifique des hydrates (SSA) est plus petite à cette température. Le rapport PC1 libre / SSA augmente à faible température, ce qui conduit une amélioration de la fluidité ou une diminution de la demande en PC1. Mais la demande en PNS de MBE-I est quasiment identique (1300 ml/100 kg de liant) entre 15 et 36°C. À 8°C, la demande en PNS pour la même fluidité augmente jusqu'à 1500 ml/100 kg de liant. L'effet de la température sur l'hydratation ou sur l'activité des molécules de PNS, qui joue un rôle plus important décide de la variation de la demande en PNS pour une fluidité fixée à différentes températures.

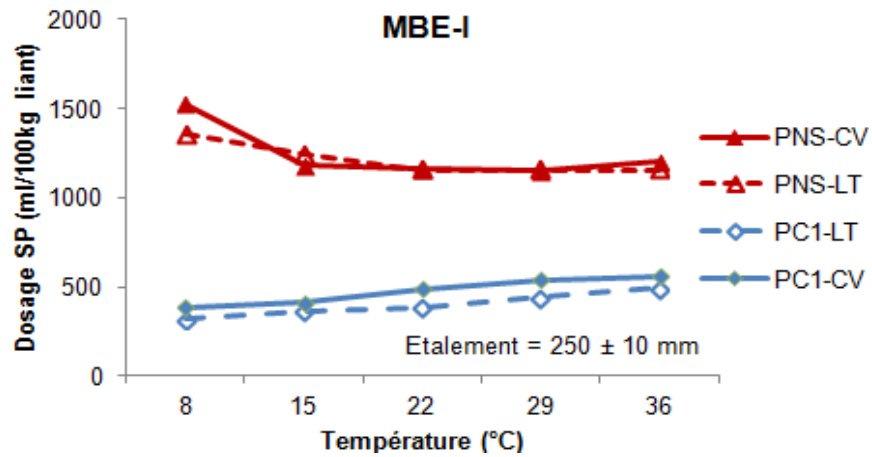


Figure 3.44 : Dosage en SP en fonction de la température pour le MBE-I avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire

L'effet de la température sur la demande en SP de BSAP-I est similaire que celle de MBE-I (Figure 3.45).

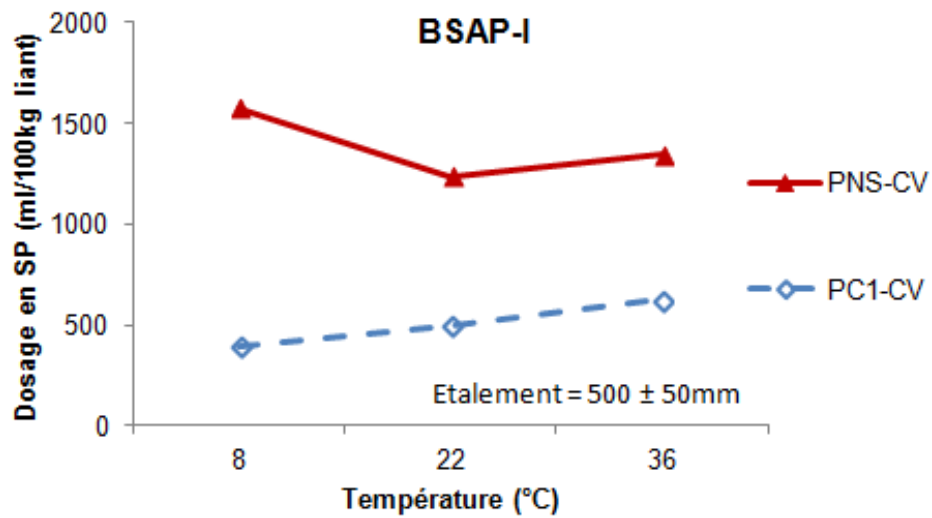


Figure 3.45 : Dosage en SP en fonction de la température pour le MBE-I avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire

Si on compare le dosage en SP (PC1 ou PNS) à différentes températures à celui de 22°C dans la Figure 3.46, on remarque que la demande en PC1 dans le MBE-I augmente linéairement avec la température. À 8°C, le dosage en PC1 diminue de 20% par rapport à celui à 22°C, alors qu'à 36°C, le dosage en PC1 est augmenté de 30% par rapport à celui à 22°C. L'effet de la température sur la demande en PNS est différent de celui sur la demande en PC1. De 15°C à 36°C, il n'y a très peu de variation sur la demande en PNS, la demande en PNS à 8°C étant 30% plus importante que celle à 22°C. Pour une température basse, on a besoin de plus de PNS pour garder le même étalement. En effet, l'effet positif de la température élevée (les sites d'adsorption ont augmenté) est plus ou moins neutralisé par l'effet négatif (accélération de l'hydratation) sur la fluidité initiale des BAP ou MBE, mais à température basse, l'effet positif de la température (sur le retard d'hydratation) est moins important que l'effet négatif de la température (les sites d'adsorption ont diminué). La validation de la demande en SP pour le BSAP-I avec CV ont été fait à 8, 22 et 36°C. Le même dosage en SP a été utilisé dans le béton BSAP-I contenant des CV afin d'avoir la fluidité désirée.

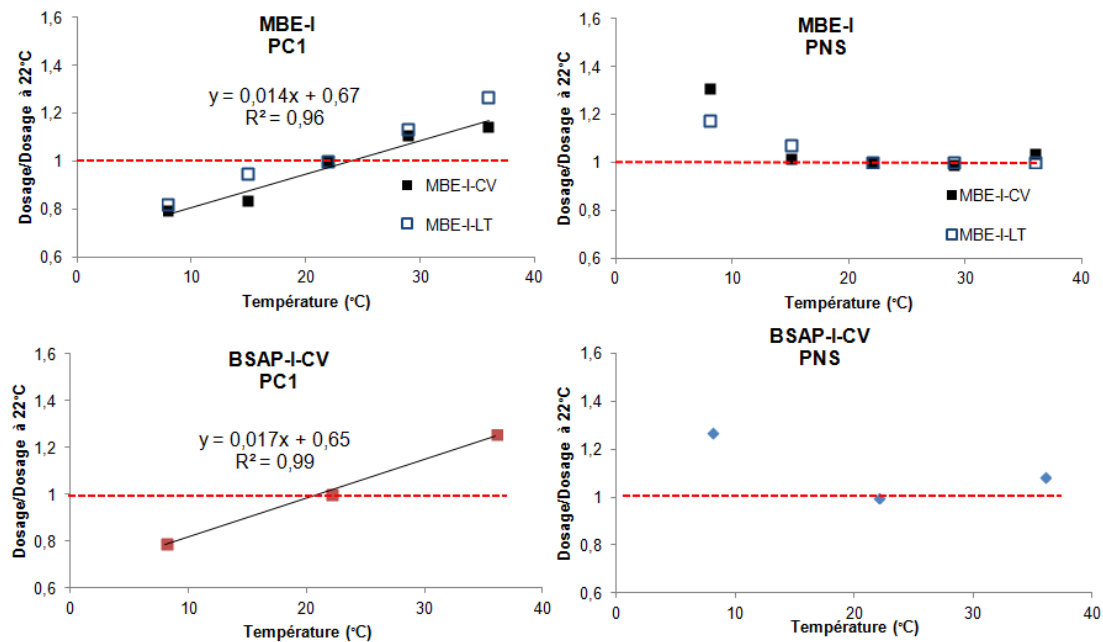


Figure 3.46 : Variation du dosage et du type en SP dans le MBE-I et le BSAP-I à différentes températures par rapport à celui à 22°C

3.3.2 Demande en AEA

Dans le BSAP-I, 5 à 8% d'air est recommandé pour améliorer la résistance aux cycles de gel/dégel quand ils sont exposés à l'eau et aux produits de déverglaçage. Un agent entraîneur d'air (AEA) est utilisé pour stabiliser volontairement des bulles d'air microscopiques dans le béton. Le but premier de l'entraîneur d'air n'est pas de créer des bulles mais de les stabiliser. Dans le MBE-I et le BSAP-I, l'AEA incorporé afin d'avoir 5 à 8% d'air stable est plus grand à 36°C que les autres températures plus faibles car l'augmentation de la température réduit tous les types de mousse (Schott, 1988). L'effet de la température influence la demande en AEA pour une teneur en air fixée. Avec l'augmentation de la température, la vitesse de création de cations polyvalents (Ca^{2+} et Al^{3+}) insolubles et la précipitation sont élevées, il y a donc moins de cations polyvalents qui aident à la stabilité de l'air dans la solution et la teneur en air diminue. Les hydrates du béton adsorbent l'AEA. À température élevée, plus l'hydratation s'accélère, plus d'AEA est adsorbée sur les hydrates, et moins d'AEA reste dans la solution, donc la teneur en air diminue.

Pour le MBE-I (Figure 3.47), le SP (PC1 ou PNS) est utilisé pour fixer la fluidité initiale (210 ± 10 mm) et l'AEA est ajusté afin de fixer la teneur en air ($5 \pm 1\%$) à différentes températures. Il est observé que la demande en AEA augmentait avec la température. Plus la température est élevée, plus d'AEA est adsorbée sur les hydrates, et moins d'AEA reste dans la solution, donc la teneur en air diminue (Du et Folliard, 2005). Pour la même teneur en air, la demande en AEA combinée avec le PNS dans le MBE-I avec le CV ou le LT est beaucoup plus grande que celle combinée avec le PC1, parce que le PC peut entraîner de l'air lui-même. De 22°C à 36°C, la demande en AEA combinée avec le PNS est 2 fois plus grande que celle combinée avec le PC1. De 8 à 15°C, le MBE-I avec le PC1 a besoin d'un très faible dosage en AEA (< 25 ml/ 100 kg de liant). Ce faible dosage en AEA n'assure pas un contrôle fiable du réseau des bulles d'air, ce qui cause les problèmes sur la durabilité du béton. La demande en AEA avec PNS a besoin de plus de 80 ml/100 kg de liant. En utilisant le même SP, le MBE-I avec la CV a besoin de légèrement plus d'AEA que celui avec le LT, car la quantité d'adjuvant entraîneur d'air nécessaire pour obtenir une teneur en air donnée est normalement plus grande en cas d'utilisation de cendres volantes (Kosmatka et al., 2004), le CV contient une partie de carbone qui peut réagir avec l'AEA.

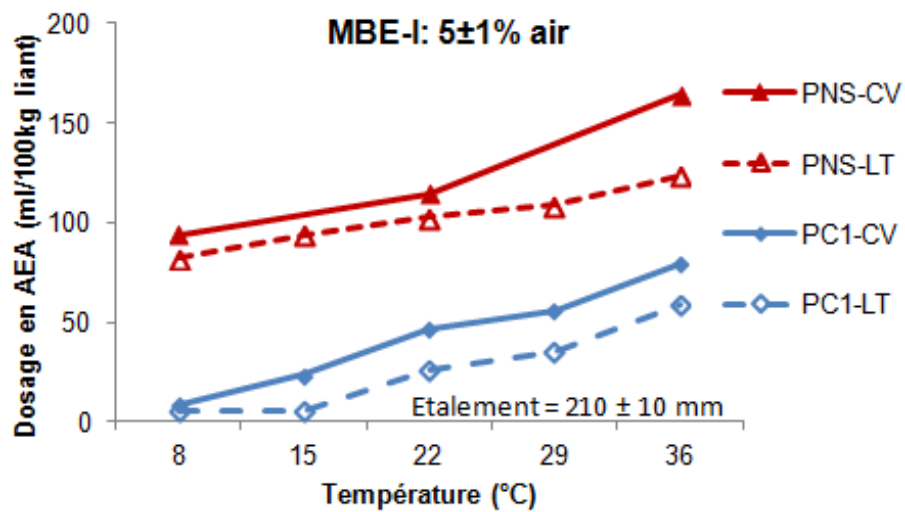
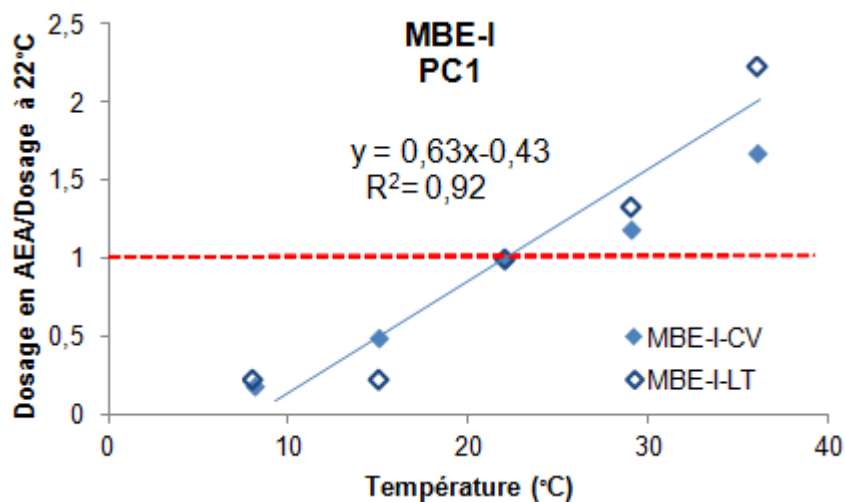


Figure 3.47 : Demande en AEA en fonction de la température pour le MBE-I avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire

La demande en AEA pour le pourcentage d'air fixée à différentes températures par rapport à celle à 22°C est présentée dans la Figure 3.48. La variation de la demande en AEA selon les différentes températures pour le MBE-I avec le PC1 est plus significative que celle pour le MBE-I avec le PNS, que ce soit avec le CV ou le LT. Pour l'AEA avec le PC1 à 8°C, la demande en AEA est 80% plus faible que celle à 22°C. Lorsqu'à 36°C, la demande en AEA augmente par contre de 120%. Mais pour l'AEA avec le PNS, la variation est plus faible (< 50%).



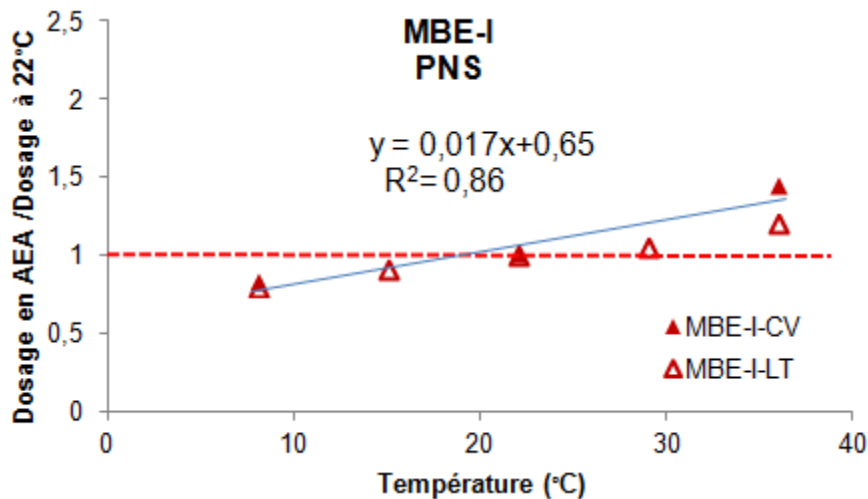


Figure 3.48 : Variation de la demande en AEA dans le MBE-I avec le PC1 et le PNS à différentes températures par rapport au dosage à 22°C

L'effet de la température sur la demande en AEA est très clair. Plus la température augmente, plus la demande en AEA est grande pour tous les types de SP et d'ajout cimentaire utilisé dans le MBE-I, car l'AEA réagit avec les hydrates à température élevée (Schott, 1988). La même observation est faite sur l'effet de la température sur la demande en AEA avec le PC1 ou le PNS et validée dans le BSAP-I avec le CV à 8, 22 et 36°C (Figure 3.49). Par contre cette fois ci, l'utilisation du même dosage en AEA du MBE-I dans le BSAP-I a augmenté la teneur en air (environ 3%) dans le BSAP-I à différentes températures.

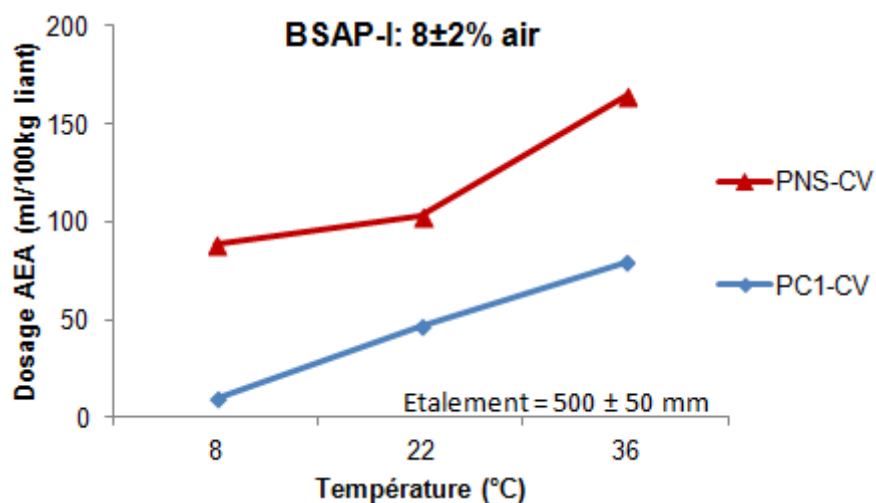


Figure 3.49 : Demande en AEA en fonction de la température pour le BSAP-I avec deux types de SP et deux types d'ajout cimentaire

3.3.3 Seuil de cisaillement initial

Généralement, une fluidité constante conduit à un seuil de cisaillement quasiment identique. Mais dans notre étude, une variation faible de seuil de cisaillement est apparue à différentes températures même si la fluidité est fixée (Figure 3.50 et Figure 3.51). À même fluidité initiale, la demande en SP varie, le seuil de cisaillement initial pour le MBE-I diminue entre 8 et 22°C. Pour le MBE-I de 22°C à 36°C, le seuil de cisaillement est quasiment identique. En effet, la demande en PC varie avec la température qui donne un effet couplé « Température-SP » sur la rhéologie. La cinétique d'hydratation augmente avec la température ce qui peut augmenter le seuil de cisaillement. Par contre la demande en PC augmente avec la température ce qui peut diminuer le seuil de cisaillement. Ces deux effets de la température opposés qui jouent un rôle prépondérant décident la valeur du seuil de cisaillement (Figure 3.50). La demande en PNS ne varie quasiment pas avec la température (sauf à 8°C), l'effet du dosage en PNS sur le seuil de cisaillement est négligeable, mais l'activité de PNS augmente avec la température ce qui peut diminuer le seuil de cisaillement. L'effet de la température sur l'activité de PNS joue un rôle plus important que celui sur la cinétique d'hydratation, donc le seuil de cisaillement diminue avec la température dans le MBE avec le PNS (Figure 3.51). Ce phénomène existe quel que soit le remplacement par la CV ou le LT dans le MBE-I.

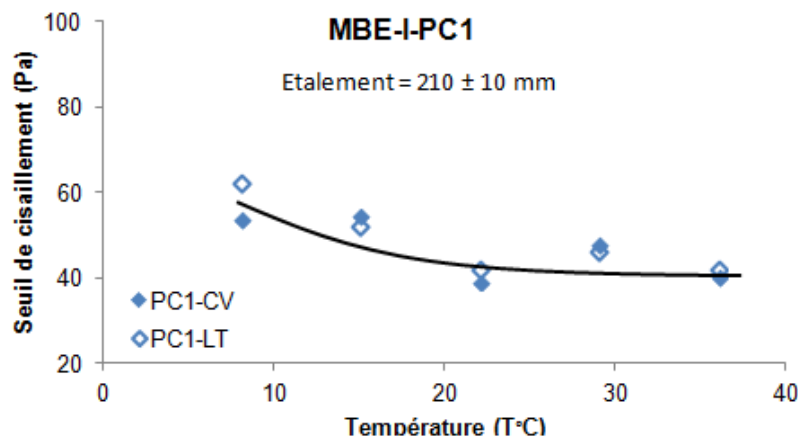


Figure 3.50: Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-I avec le PC1 et deux types d'ajout cimentaire

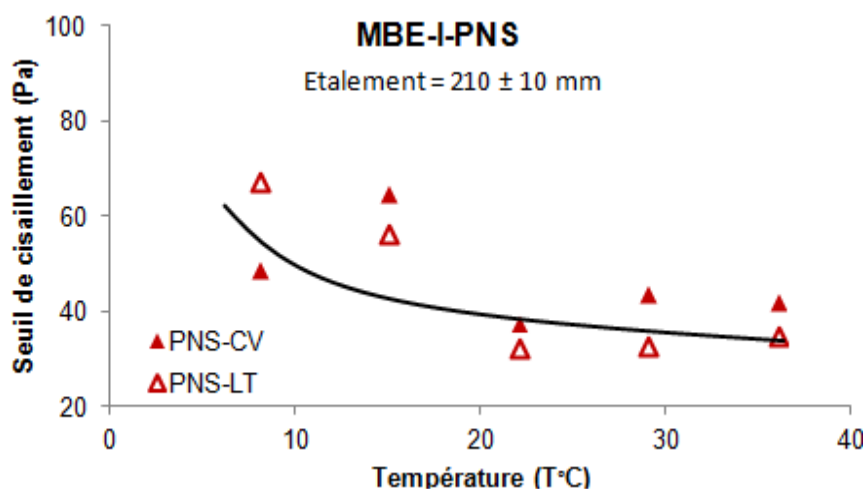


Figure 3.51: Seuil de cisaillement en fonction de la température pour le MBE-I avec le PNS et deux types d'ajout cimentaire

Pour le BSAP-I, la variation du seuil de cisaillement selon la température est différente de celle du MBE-I. Aux températures extrêmes (8° ou 36°C), le seuil de cisaillement est plus grand que celui à la température ambiante de 22°C (Figure 3.52). La différence d'effet de la température sur la variation de seuil de cisaillement entre le MBE-I et le BSAP-I apparaît à 36°C, notamment dans le BSAP-I avec le PNS. Cet effet peut être causé par la perte de fluidité rapide pendant la mesure à la température de 36°C du BSAP-I.

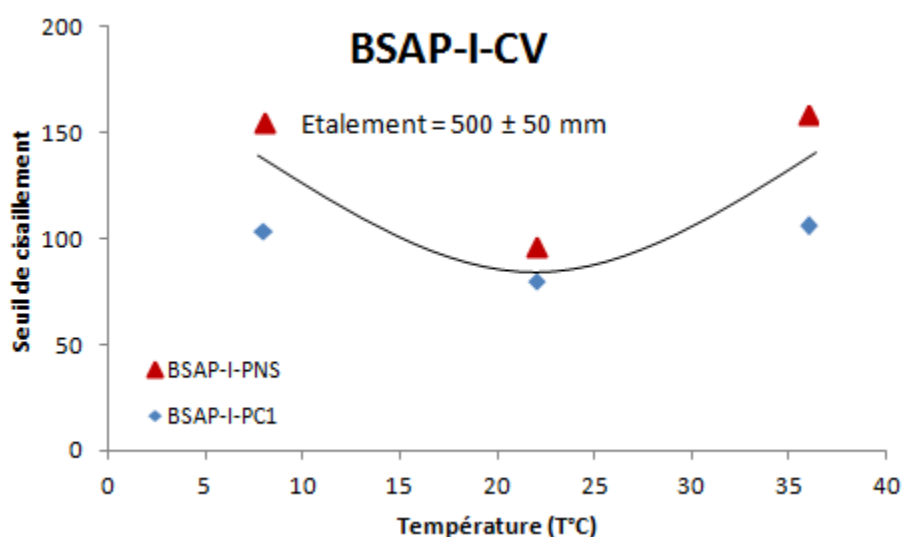


Figure 3.52 : Seuil de cisaillement en fonction de la température du BSAP-I contenant des CV

3.3.4 Viscosité plastique initiale

L'effet de la température sur la viscosité plastique initiale de MBE-I est faible et désordonné. Les valeurs de la viscosité plastique de MBE-I sont entre 2,8 et 5 Pa.s quel que soit le type de SP et d'ajout cimentaire (Figure 3.53). Il y a très peu de variation de viscosité plastique avec la température pour le BSAP-I. Les valeurs de la viscosité plastique sont environ 40 Pa.s (Figure 3.54).

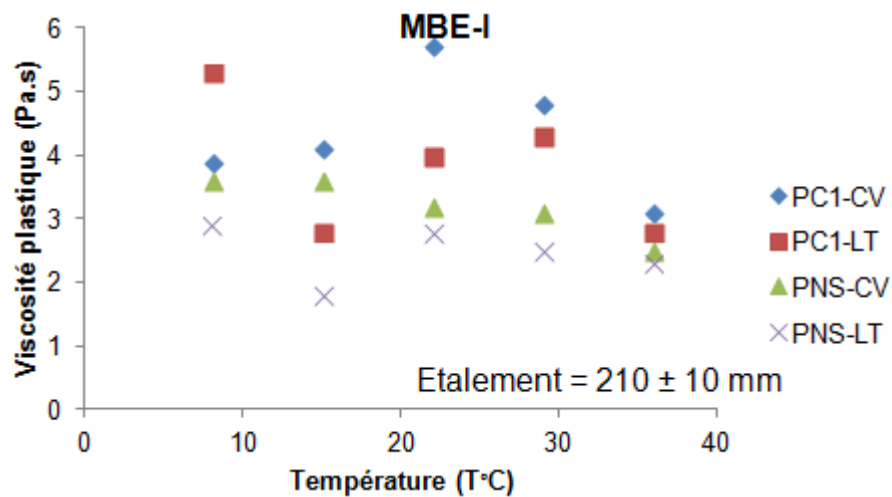


Figure 3.53 : Viscosité plastique initiale du MBE-I à différentes températures

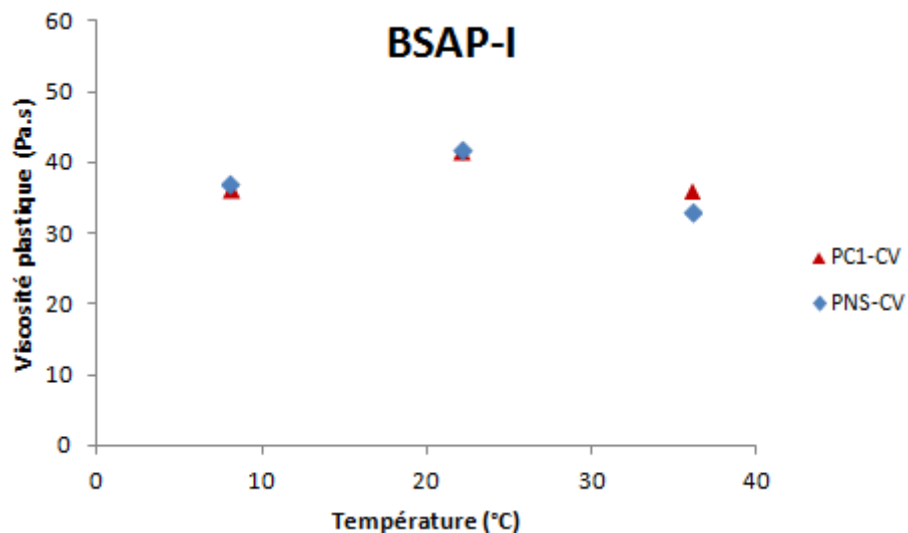


Figure 3.54 : Viscosité plastique initiale du BSAP-I à différentes températures

3.3.5 Résistance en compression

3.3.5.1 A court terme

Les températures du MBE-I sont respectivement de 8, 15, 22, 29 et 36°C lors du malaxage, de la mise en place et de la cure des échantillons jusqu'aux tests de résistance en compression (f_c) à court terme (ici de 1 et 7 jours).

La résistance en compression du MBE-I à court terme augmente linéairement avec la température (Figure 3.55) comme celle du MBE-B et du MBE-P (chapitre 3.2). Le type de SP (PNS ou PC1), le dosage en SP (pour la fluidité fixée : 210 ± 10 mm) et le type d'ajout cimentaire (CV ou LT à 25% en remplacement) ne influence pas beaucoup la f_c à court terme. Seule l'augmentation de la température (de 8°C à 36°C) améliore la f_c à court terme. L'effet de la température sur la résistance en compression à 1 jour est plus grand que celui sur le f_c à 7 jours. À 1 jour, la valeur de f_c du MBE-I à températures extrêmes (8 et 36°C) est plus ou moins de 90 % respectivement par rapport à celle à 22°C. Alors qu'à 7 jours, cette variation aux températures extrêmes (8 et 36°C) est plus petite (plus ou moins de 30% respectivement) par rapport à celle à 22°C. La température a pour effet d'accélérer significativement l'hydratation du ciment : la consommation plus rapide des grains de ciment génère du C-S-H et de la portlandite en quantités importantes dès les premières heures de la cure, ce qui induit un développement de résistance plus rapide. De la même manière, les sources de sulfates sont épuisées plus rapidement et les phases aluminates type Afm sont observées aux jeunes âge lorsque la température augmente (Gallucci et al., 2006).

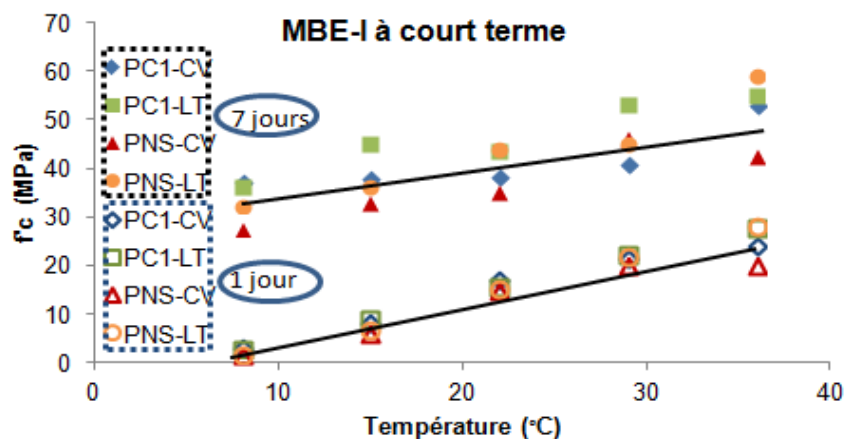


Figure 3.55 : Résistance en compression à court terme du MBE-I en fonction de la température avec différents types de SP et d'ajout cimentaire

La validation sur béton a été faite pour 8, 22 et 36°C, uniquement pour le BSAP-I avec le CV et PC1. À 1 jour, la f_c du BSAP-I augmente ainsi avec l'augmentation de la température (Figure 3.56). Il y a une bonne corrélation entre le MBE-I et le BAP-I pour la f_c à 1 jour. Cette corrélation est parfaitement linéaire. La valeur de f_c pour le BAP-I a augmenté aussi selon la température (Figure 3.57). La valeur de la résistance à 1 jour de MBE-I est légèrement plus petite que celle de BAP-I.

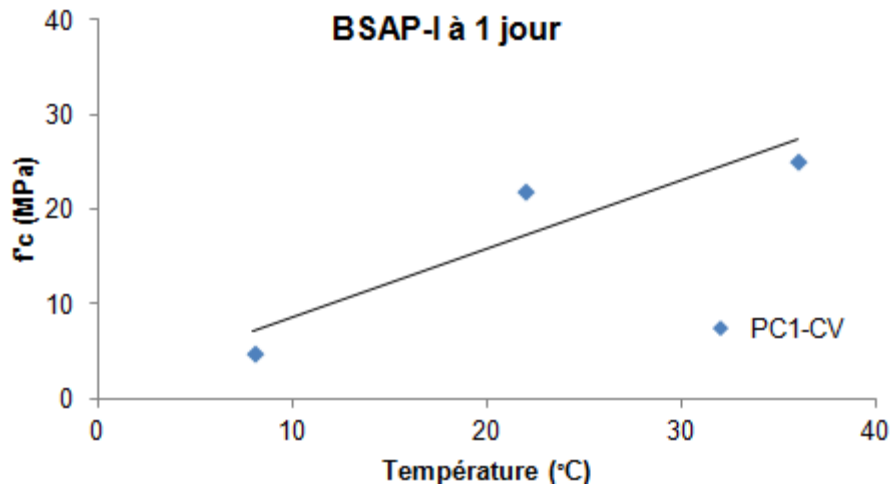


Figure 3.56 : Résistance en compression à 1 jour du BSAP-I en fonction de la température avec le PC1 et les CV

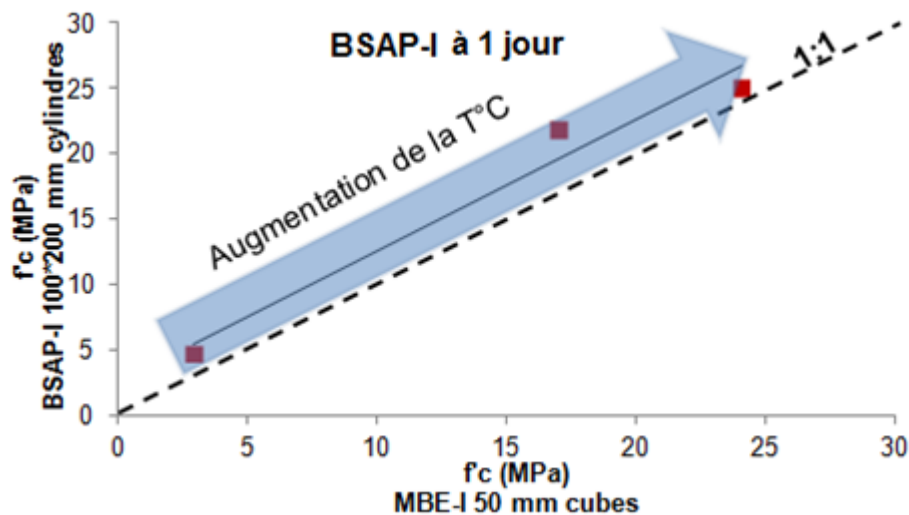


Figure 3.57 : Corrélation de la résistance en compression à 1 jour du BSAP en fonction de celle sur MBE-I

3.3.5.2 À long terme

Les échantillons pour les tests de résistance en compression (f_c) à long terme (ici 28 et 56 jours) ont été coulés et mûris aux températures indiquées pendant la 1^{ère} journée avant le démoulage, puis ont été conservés dans la salle à 100% HR et 22°C jusqu'à échéance. Généralement, la résistance en compression à long terme diminue quand la température de murissement est élevée (Kosmatka et al., 2004). Dans notre cas, à la température de cure initiale, les éprouvettes ont ensuite été conservées à 22°C pour les essais à long terme. L'effet de la température sur la f_c à long terme est plus faible que celle à court terme. Pour le MBE-I contenant des CV, la variation de f_c est de $\pm 10\%$. Pour le MBE-I avec le LT, la variation est légèrement plus grande, la f_c à 8°C est 40% plus grande que celle à 22°C alors que la f_c à 36°C est 7% plus grande que celle à 22°C (Figure 3.58).

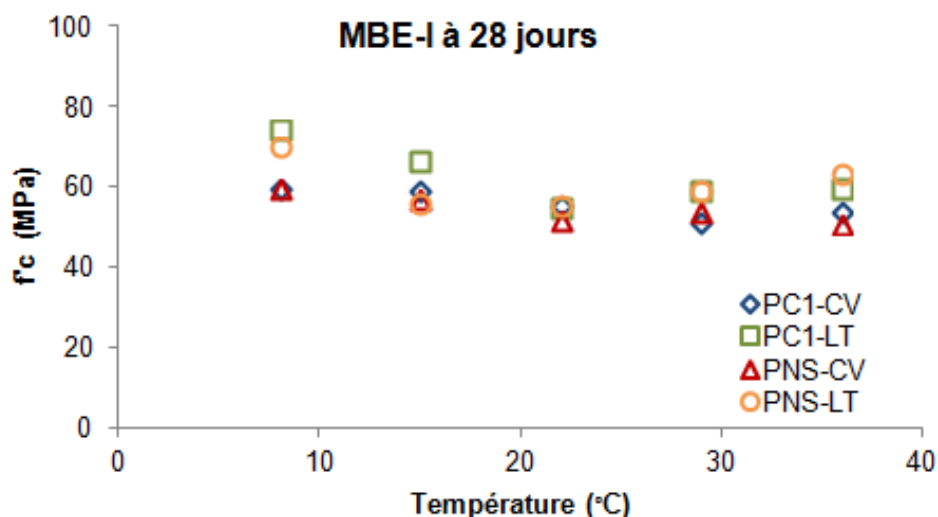


Figure 3.58 : Résistance en compression à 28 jours du MBE-I en fonction de la température avec différents types de SP et d'ajout cimentaire

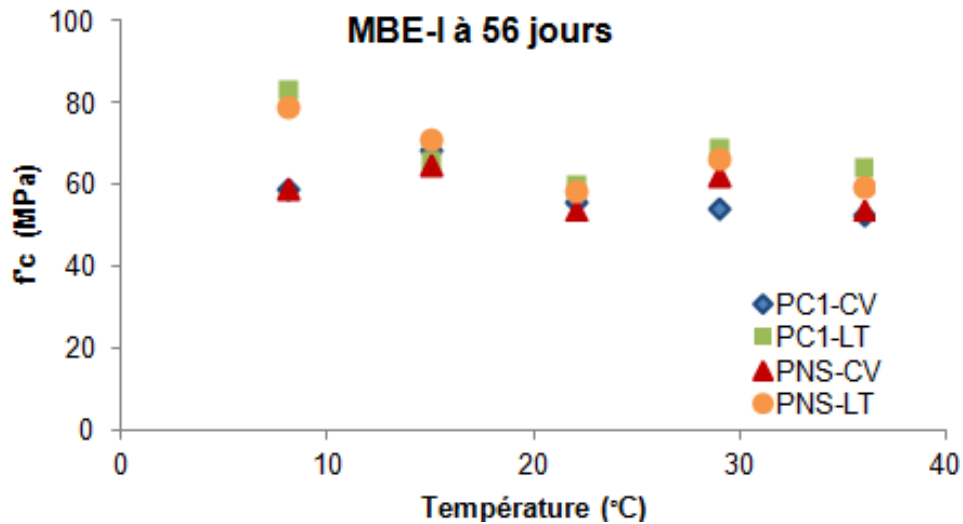


Figure 3.59 : Résistance en compression à 56 jours du MBE-I en fonction de la température avec différents types de SP et d'ajout cimentaire

Le même phénomène existe dans le BAP-I (Figure 3.60). Les valeurs de f'_c à 28 jours du BSAP-I avec le PNS ou le PC1 sont similaires, il n'y a pas d'effet du type de SP sur la f'_c à 28 jours. Par contre, La température influence légèrement sur la f'_c à 28 jours. De 8°C à 36°C, la f'_c à 28 jours de BSAP-I diminue d'environ 20%.

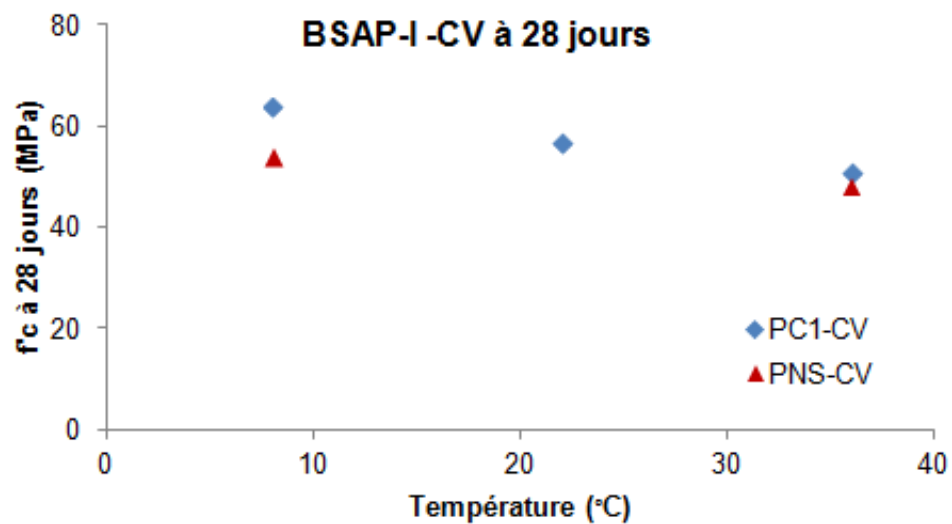


Figure 3.60 : Résistance en compression à 28 jours du BSAP-I en fonction de la température avec les CV

3.3.6 Retrait de séchage et durabilité

Le retrait de séchage et la durabilité des infrastructures de béton est un sujet qui, aujourd'hui, suscite un intérêt grandissant, particulièrement dans les régions froides. L'entretien et la réparation de ces structures exigent une part croissante de fonds publics puisque plusieurs ouvrages arrivent à la fin de leur vie. Le béton semi-autoplaçant pour infrastructure (BSAP-I) doit durer longtemps et nécessiter peu d'entretien ; il doit donc bien résister aux conditions d'exposition anticipées. Par la suite, l'objectif est de vérifier si un BSAP-I à 22°C qui a un faible retrait de séchage et une bonne durabilité, possède également une bonne durabilité aux températures extrêmes (8 et 36°C).

3.3.6.1 Retrait de séchage

Les échantillons de BSAP-I pour les tests de retrait de séchage ont été coulés et mûris aux températures indiquées pendant la 1^{ère} journée avant démoulage, puis ils ont été conservés dans l'eau à 22°C jusqu'à 7 jours après le contact eau/ciment. Le retrait de séchage résulte du séchage lent du béton durci dans le temps selon la norme ASTM C157. Il résulte d'un déséquilibre hygrométrique entre le BSAP-I dans l'air et le milieu extérieur (salle à 22°C à 50% HR). À différentes températures de béton (8, 22 et 36°C). Les BSAP-I ont conféré un niveau de retrait de séchage entre 500 à 700 $\mu\text{m/m}$ (Figure 3.61). Ce comportement est dû à différentes températures de béton et mûrissement indiquées pendant la 1^{ère} journée avant démoulage et à la variation du milieu de conservation après 1 jour.

Comme on peut le constater sur la Figure 3.61, l'évolution du retrait de séchage pour les trois températures de BSAP n'est pas la même. Normalement, au jeune âge, une plus faible température de cure peut diminuer le retrait de séchage (Gebler et Klieger, 1986). En effet, pour une température élevée, le taux d'hydratation est élevé, la microstructure de béton est plus dense. Mais sur cette figure, on observe que le retrait de séchage pour le béton à la température normale (22°C) est plus grand que celui aux températures extrêmes (8°C ou 36°C). Elle est inverse du phénomène prévu. Après 1 jour, les échantillons ont été mûris dans l'eau à 22°C jusqu'à 7 jours après le contact eau/ciment. Donc pour le BSAP-I à température initiale de 8°C, l'augmentation de la température de mûrissement (+14°C) a accéléré l'hydratation et la matrice a été remplie de façon moins homogène que prévu par les produits d'hydratation. Pour le BSAP-I à température initiale de 36°C, la diminution de la température de mûrissement (-14°C) a ralenti l'hydratation et

il y a moins de produits d'hydratation que prévu autour des grains de ciment. La modification du processus d'hydratation aide à améliorer la résistance au séchage.

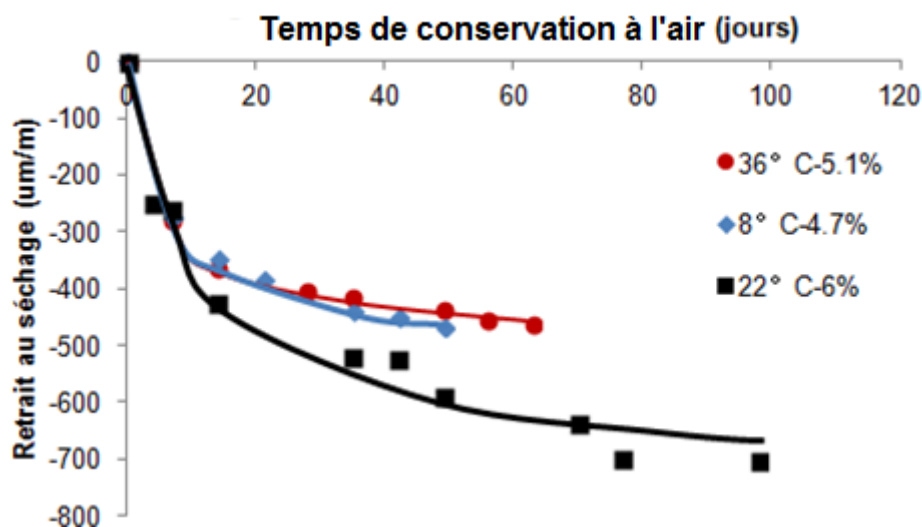


Figure 3.61 : Retrait de séchage du BSAP-I en fonction du temps de séchage dans la salle à 22°C à 50% HR

3.3.6.2 Résistance au gel/dégel

Les échantillons de BSAP-I pour les tests de résistance au gel/dégel ont été coulés et mûris aux températures indiquées pendant la 1^{ère} journée avant démoulage, puis ils ont été mûris dans la salle à 100% HR et 22°C jusqu'à 14 jours après le contact eau/ciment. La résistance au gel/dégel est déterminée grâce à l'essai en laboratoire ASTM C666. En s'appuyant sur les résultats de l'essai, on a calculé un facteur de durabilité reflétant le nombre de cycles de gel/dégel nécessaires pour produire une détérioration donnée (Figure 3.62). Dans tous les cas, le facteur de durabilité est supérieur à 60%. À 22°C et 36°C, il n'a pas changé jusqu'à 300 cycles de gel/dégel ($\approx 100\%$). Mais le facteur de durabilité de BSAP-I à la température initiale de 8 °C commence à diminuer après 170 cycles. Après 300 cycles de gel/dégel, il baisse jusqu'à 60%, ce qui est beaucoup plus faible que pour les autres températures. La déformation de l'échantillon commence à s'élever ainsi de plus en plus après 170 cycles de gel/dégel (Figure 3.63). En revanche, pour les essais à 22 et 36°C, aucune déformation n'est observée jusqu'à 300 cycles de gel/dégel. La teneur en air de ces BSAP-I à différentes températures initiales est quasiment identique ($5 \pm 1\%$). Le BSAP-I-PC1 à 8°C possède une mauvaise résistance au gel/dégel à cause du faible dosage en PC1 qui n'assure pas le contrôle fiable du réseau des bulles d'air et des gros bulles d'air entraînées à cette température faible. Le phénomène pourrait ainsi s'expliquer par le

facteur d'espacement, non mesuré dans cette thèse. La demande en AEA est très faible à 8°C, la basse température elle-même garde les bulles d'air dans le BSAP-I, mais avec un faible effet d'AEA. Les bulles d'air ne sont pas assez petites et bien dispersées. Si les bulles d'air sont trop éloignées, et que la distance à parcourir est supérieure au facteur d'espacement maximal, alors la pression engendrée à l'intérieur des pores sera supérieure à la résistance à la traction de la pâte et provoquera la fissuration de la matrice.

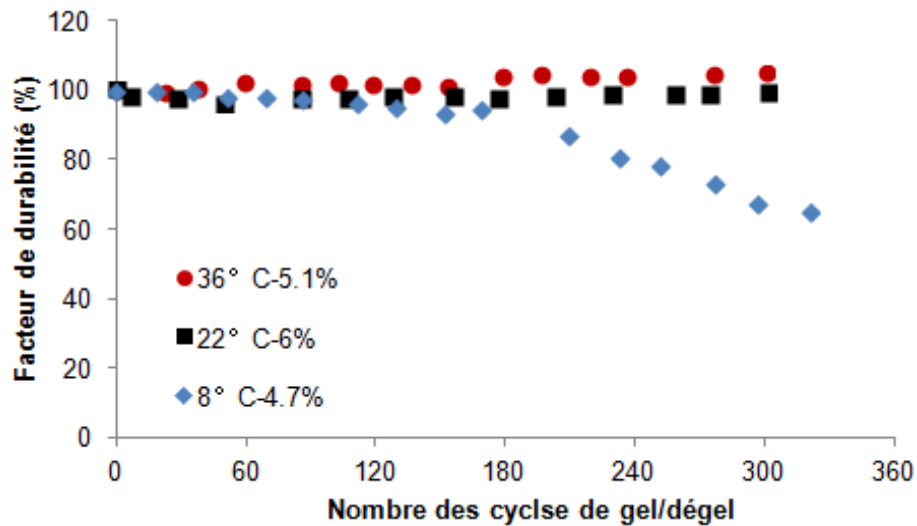


Figure 3.62 : Facteur de durabilité du BSAP-I en fonction du nombre de cycles de gel/dégel

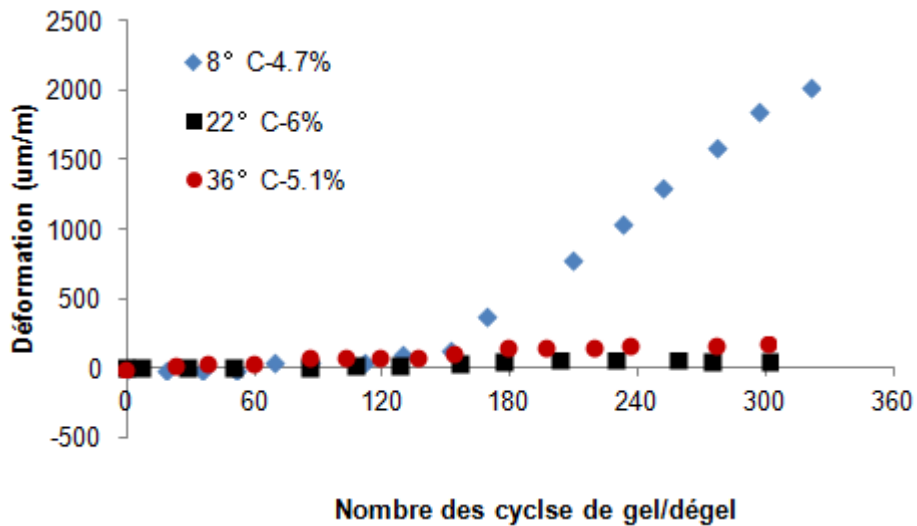


Figure 3.63 : Déformation du BSAP-I en fonction du nombre de cycles de gel/dégel

3.3.6.3 Résistance à l'écaillage

Les échantillons de BSAP-I pour les tests de résistance à l'écaillage ont été coulés et mûris aux températures indiquées pendant la 1^{ère} journée avant démoulage, puis conservés dans la salle à 100% HR et 22°C jusqu'à 56 jours après le contact eau/ciment. La résistance à l'écaillage est déterminée grâce à l'essai en laboratoire BNQ 2621-900. Dans la Figure 3.64, on remarque que les pertes de masse après 50 cycles de gel/dégel pour les essais à 22°C et 36°C sont acceptables car inférieures à la limite maximale de 1000 g/m² spécifiée. Celles à 22°C sont même excellentes car inférieures à 500 g/m². Le résultat de la résistance à l'écaillage est identique à celui obtenu pour la résistance au gel/dégel qui est une mauvaise à 8°C à cause des grosses bulles d'air entraînées à température faible. Les critères d'essai sur le facteur de durabilité pour la résistance au gel/dégel et l'écaillage sont différents. En effet, cette dernière dépasse la limite acceptable au 5^{ème} cycle alors que la détérioration commence à apparaître pour la résistance au gel/dégel à environ 180 cycles. Le phénomène pourrait s'expliquer par le facteur d'espacement, non mesuré dans cette thèse. La demande en AEA est très faible à 8°C, la basse température elle-même garde les bulles d'air dans le BSAP-I, mais avec un faible effet d'AEA. Les bulles d'air ne sont pas assez petites et bien dispersées. Si les bulles d'air sont trop éloignées, et que la distance à parcourir est supérieure au facteur d'espacement maximal, alors la pression engendrée à l'intérieur du pore sera supérieure à la résistance à la traction de la pâte et provoquera la fissuration de la matrice.

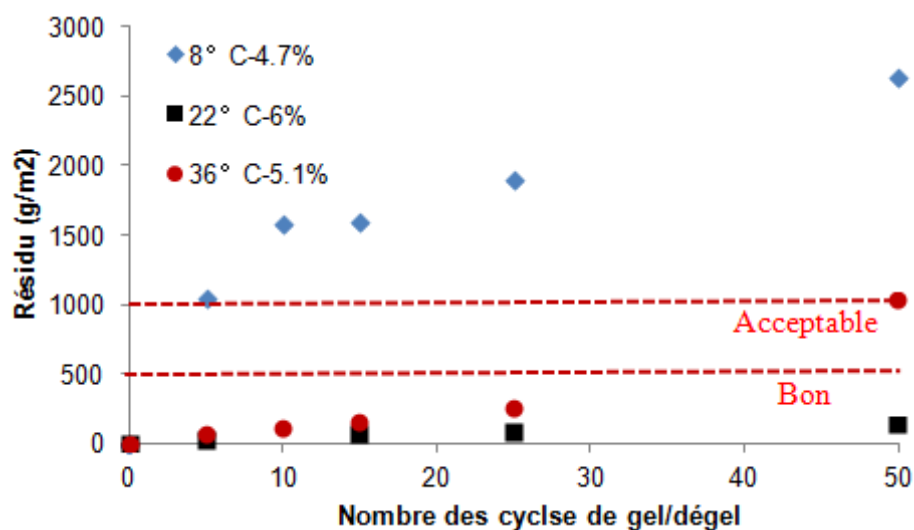


Figure 3.64 : Perte de masse en surface de BSAP-I en fonction du nombre de cycles de gel/dégel

3.3.7 Conclusion

Le but visé dans cette partie d'étude était de connaître l'effet de la température sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée (BAP-B et BSAP-I) et des MBE correspondants. Trois types de SP (PC1, PC2 et PNS) et quatre types d'ajout cimentaire (CV, FC, FS et LT) sont incorporés dans ces bétons et mortiers et testés à différentes températures. Les résultats concernant l'effet de la température montrent que :

- La consommation de PC1 dans le mortier après 40 minutes du contact eau-ciment varie avec la température. Plus la température est élevée, plus le PC1 est consommé. Le PNS dans le mortier après 30 minutes du contact eau-ciment est presque entièrement consommé quelle que soit la température.
- La température élevée augmente la surface spécifique des hydrates à un âge donné.
- La fluidité diminue linéairement avec l'augmentation de la température quand le dosage en PC1 est fixé car la consommation de PC1 augmente avec la température. Au contraire si la fluidité est fixée, la demande en PC1 ou PC2 dans les MBE et les bétons fluides à rhéologie adaptée augmente linéairement avec la température. Mais la demande en PNS ne varie pas à la température supérieure à 22°C. Elle augmente d'environ 20% quand la température est faible (8°C).
- La température influence l'entraînement d'air pendant le malaxage. Plus la température est faible, plus d'air est entraîné dans les MBE et les BAP sans AEA. Par conséquent, pour une teneur en air fixée, la demande en AEA augmente avec la température dans le MBE-I et le BSAP-I.
- L'effet de la température est plus grand sur la demande en AEA dans le mélange cimentaire avec le PC que celle avec le PNS. À 36°C, la demande en AEA dans le mélange avec le PC est deux fois plus grande que celle à 8°C.
- À même fluidité, le seuil de cisaillement du mélange cimentaire change légèrement selon la variation de la température. Pour le MBE-B et le MBE-I, le seuil de cisaillement est plus grand à température faible. Mais pour le MBE-P, le seuil est plus grand à la température élevée. Pour le BAP-B et le BSAP-I, le seuil de

cisaillement est plus grand aux températures extrêmes (chaude ou froide). L'effet de la température influence la demande en SP, l'activité de SP et l'hydratation des mélanges cimentaires. Ces trois derniers augmentent ou diminuent le seuil de cisaillement, décident la valeur du seuil de cisaillement à différentes températures.

- L'augmentation de la température augmente le flux maximal, réduit le temps de début de prise et accélère la dissolution d'ettringite qui est présenté par le troisième pic de flux (hydratation de C_3A).
- La température élevée augmente linéairement la résistance en compression à court terme (1 et 7 jours) des MBE et des BAP. Le pourcentage de remplacement du ciment par l'ajout cimentaire fait varier la $f'c$. A long terme (28 ou 56 jours), la température initiale influence peu la $f'c$. L'effet de la température sur la $f'c$ des MBE-B, MBE-P et BSAP-B est inférieur de 10%, celui pour le MBE-I et BSAP-I est inférieur d'environ 20%.
- La durabilité du BSAP-I-PC1 est analysée par le retrait de séchage, la résistance au gel/dégel et la résistance à l'écaillage. Le retrait de séchage de BSAP-I à 8 et 36°C est inférieur de celui à 22°C (800 $\mu m/m$). Mais la température du béton faible (8°C) donne une mauvaise résistance au gel/dégel et à l'écaillage. Les cycles de gel/dégel provoquent rapidement la détérioration de la surface du BSAP-I à 8°C à cause du faible dosage en PC1 qui n'assure pas le contrôle fiable du réseau des bulles d'air.

Tableau 3.3 : Conclusions sur l'effet de la température par rapport à 22°C

		T° faible	T° élevée
Surface spécifique des hydrates	CV	-20%	+5%
Absorbance après 30 min	PC1	-5%	+10%
	PNS	-	-
Fluidité	PC1	+30%	-30%
	PNS	-	-
Demande en SP	PC1	-30%	+30%
	PNS	-	-
Demande en AEA	PC1	-90%	+75%
	PNS	-25%	+25%
Seuil de cisaillement	MBE-B et MBE-I	+200%	-
	MBE-P	-	+300%
	BAP-B et BSAP-I	+130%	+30%
Flux maximal	tous	-70%	+70%
Temps de début de prise	tous	+80%	-20%
Résistance en compression	à court terme	-90%	+70%
	à long terme	-	-
Retrait de séchage	BSAP-I	-30%	-30%
Résistance au gel/dégel	BSAP-I	-40%	-
Résistance à l'écaillage	BSAP-I	-100%	-

Le type de SP et le type d'ajout cimentaire ont une influence sur les propriétés des bétons et des mortiers correspondants telle que :

- Le type de SP (PC1 ou PNS) a un effet significatif sur la vitesse de consommation du SP dans le temps, la demande en SP pour une fluidité fixée, la demande en AEA pour une teneur en air fixée, le flux maximal et le temps de début de prise.
- Le type d'ajout cimentaire (CV, FC, FS et LT) utilisé fait varier la demande en SP pour une fluidité fixée, le flux maximal, la forme du troisième pic de flux et le temps de début de prise.

Après avoir étudié l'effet de la température sur les performances des BAP, il est intéressant de vérifier l'effet de l'agitation sur ces propriétés ainsi que l'effet couplé de l'agitation et de la température. Cette partie fera d'objet du chapitre suivant.

Chapitre 4 Effet de l'agitation et effet couplé de l'agitation et de la température sur la performance des bétons fluides à rhéologie adaptée et des mortiers correspondants

Entre le gâchage et le déchargement complet du béton, des tours supplémentaires (agitation) sont nécessaires afin de garder le béton homogène. La norme CSA A23.1 limite à 120 minutes le temps qui doit s'écouler entre le gâchage et le déchargement complet du béton au chantier. Il ne faut pas confondre le malaxage et l'agitation du béton. En fait, le malaxage du béton est fini dès que le béton sort du malaxeur. Mais l'agitation continue entre le gâchage et le déchargement complet du béton. Actuellement, il y a des études sur l'effet du malaxage ou malaxage prolongé. Par exemple, la consommation de SP est influencée par le nombre de tour de malaxage cumulé (Vickers et al., 2005). L'énergie de malaxage (vitesse+temps) influence l'hydratation, la rhéologie, la teneur en air et la résistance en compression (Rupnow et al., 2007 ; Kirca et al., 2002 ; Kwelle et Mofunlewi 2008 ; Ferraris 2001 ; Chopin 2003 ; Roussel et al., 2012 ; Kosmatka et al., 2004). Généralement, la vitesse d'agitation du béton est toujours plus lente et la durée d'agitation est plus longue que la vitesse et la durée de malaxage.

L'effet de l'agitation sur les propriétés du béton autoplaçant (BAP) est-il identique à l'effet du malaxage ? L'effet de l'agitation est composé par l'effet de la vitesse d'agitation et l'effet du temps d'agitation. Lequel joue un rôle prépondérant sur les propriétés du BAP et des mortiers correspondants ? L'agitation à différentes températures donne-t-elle un effet identique ? Pour répondre à tous ces points intéressants, les études dans ce chapitre seront présentées comme suit :

La première phase d'étude a pour but d'analyser l'effet de l'agitation à la température de 22°C sur la variation de la fluidité, la stabilité de la teneur en air, la résistance en compression et la durabilité des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA) (BAP ou BSAP) et des mortiers correspondants. Ensuite la deuxième phase montrera l'effet de l'agitation aux températures extrêmes (8°C et 36°C), et l'effet couplé de l'agitation et de la température sur les propriétés des bétons et des mortiers correspondants. Ce chapitre étudiera les propriétés de mélanges cimentaires pendant deux heures tant que le mélange reste ouvrable.

4.1 Effet de l'agitation dans le temps sur la performance des BAP-B et BSAP-I et des mortiers correspondants à 22°C

4.1.1 Effet de l'agitation dans le temps sur la fluidité à 22°C

Les fluidités initiales des mortiers et des bétons étudiés dans cette thèse ont été fixées afin d'avoir des résultats comparables. Ils étaient de 260 mm, 250 mm, 210 mm et 500 mm respectivement pour le MBE-B, MBE-P, MBE-I et BSAP-I. Après le malaxage et avant l'échantillonnage, ces mélanges cimentaires ont été gardés dans le malaxeur avec une certaine agitation. La fluidité a varié à cause de la consommation de SP et de l'hydratation pendant cette agitation. L'effet de la vitesse et de la durée d'agitation sur la variation de la fluidité (perte de la fluidité) dans le temps sont présentés dans les figures suivantes par l'étalement dans le temps par rapport à l'étalement initial. La Figure 4.1 et la Figure 4.2 montrent la différence de fluidité dans le temps entre l'utilisation d'un PC1 et celle d'un PNS. Les MBE (MBE-B et MBE-I) avec le PC1 maintiennent mieux l'étalement dans le temps. À 30 minutes de l'agitation, la fluidité peut être améliorée par rapport la fluidité initiale. Et le MBE reste encore fluide jusqu'à 120 minutes ($> 0,4$). En revanche, le mélange avec le PNS perd plus vite en étalement, il n'est plus fluide après 60 minutes. Les différences dépendant de la différence de structure de molécule de PC1 et PNS donnent un mode d'action à long ou court terme, respectivement.

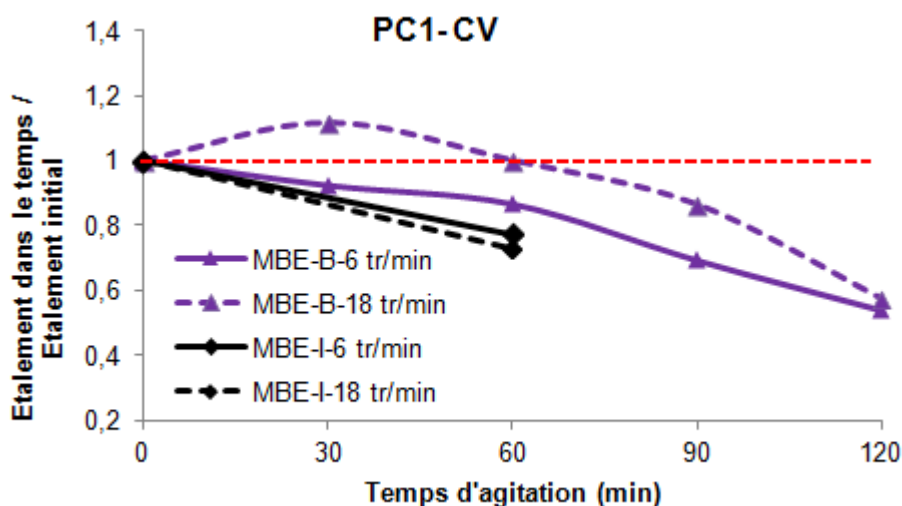


Figure 4.1 : Variation de la fluidité dans le temps des MBE-B-CV et MBE-I-CV avec le PC1 aux différentes vitesses d'agitation

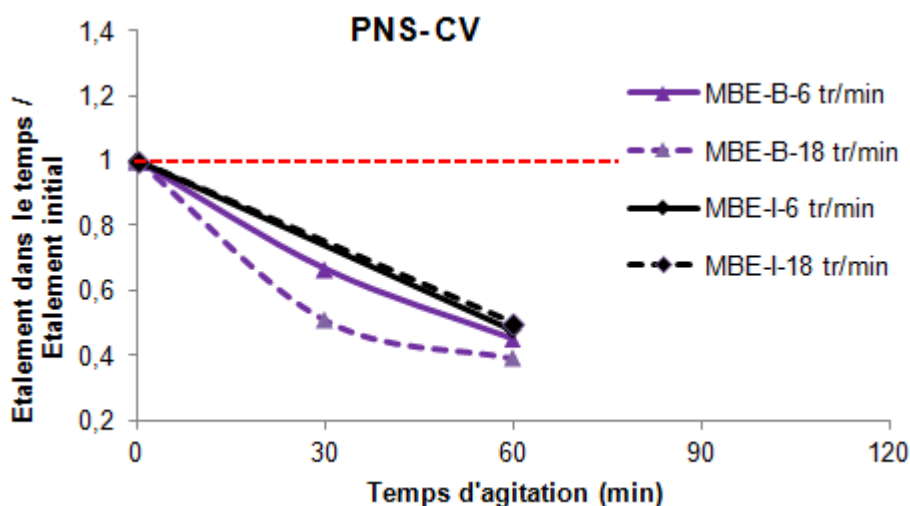


Figure 4.2 : Variation de la fluidité dans le temps des MBE-B-CV et MBE-I-CV avec le PNS aux différentes vitesses d'agitation

Deux vitesses d'agitation (6 et 18 tr/min) ont été utilisées dans le temps jusqu'à ce que le mélange ne soit plus fluide pour le MBE-B et MBE-I. La Figure 4.1 et la Figure 4.2 montrent que les différentes vitesses d'agitation dans le temps ont une influence sur le MBE-B qui contient plus de SP (PC1 ou PNS) pour une fluidité initiale fixée (260 ± 10 mm). Dans le MBE-I qui contient moins de SP (PC1 ou PNS) pour une fluidité plus petite (210 ± 10 mm), la variation de la fluidité dans le temps est identique aux deux vitesses d'agitation, l'effet de la vitesse d'agitation dans le temps n'est pas significative.

L'effet de la vitesse d'agitation dans le temps sur la fluidité est influencé par le type de SP utilisé dans le MBE-B (Figure 4.3 et Figure 4.4). L'effet de la vitesse d'agitation est très significatif pour la fluidité du MBE-B avec les deux types de SP. Les différences dépendant de la différence de structure de molécule de PC1 et PNS donnent un mode d'action à long ou court terme, respectivement. Pour le MBE-B avec le PC1, la vitesse d'agitation normale (6 tr/min) donne une fluidité plus petite que le mélange avec la vitesse d'agitation élevée (18 tr/min). En effet, la structure de PC1 est de type « peigne » ce qui agit par répulsion stérique et électrostatique, et a un mode d'action à long terme. Après le malaxage, une quantité de PC1 piégée entre les hydrates maintient la fluidité dans le temps. L'agitation élevée qui a une énergie assez grande aide à casser les C-S-H entre les hydrates et donc, libère les PC1 piégés et améliore la fluidité. La vitesse d'agitation élevée accélère ainsi le pourcentage d'adsorption de PC1 sur la surface spécifique des hydrates donc améliore la fluidité. Par contre, pour le MBE-B avec le PNS, la vitesse d'agitation élevée

réduit la fluidité à cause de sa molécule à structure linéaire à répulsion électrostatique qui a un mode d'action à court terme. La plupart du PNS est déjà consommé pendant le malaxage, la vitesse d'agitation accélère simplement la surface spécifique des hydrates et la vitesse d'hydratation, ce qui aide à réduire la fluidité. Le temps d'agitation peut aussi accélérer l'action de PC1 donc l'étalement de MBE-B à 30 minutes peut être plus grand que celui à 0 minute.

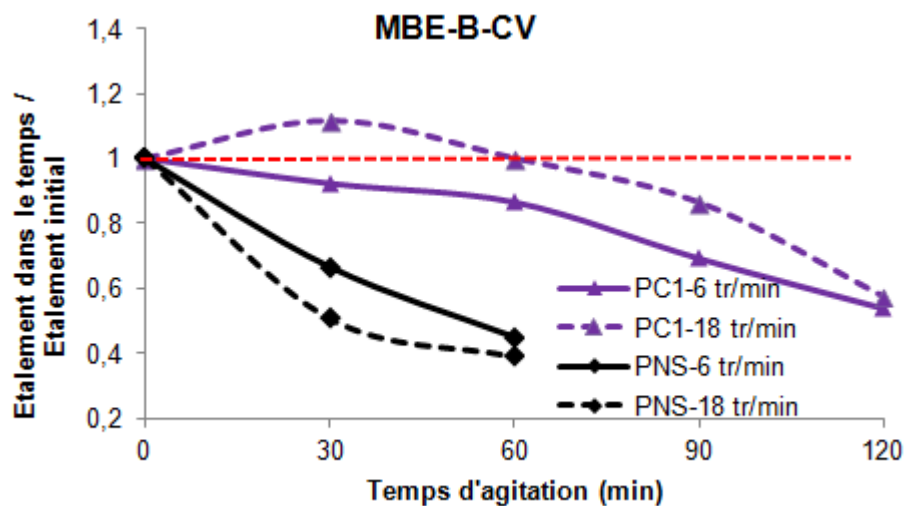


Figure 4.3 : Variation de la fluidité dans le temps du MBE-B avec CV aux différentes vitesses d'agitation

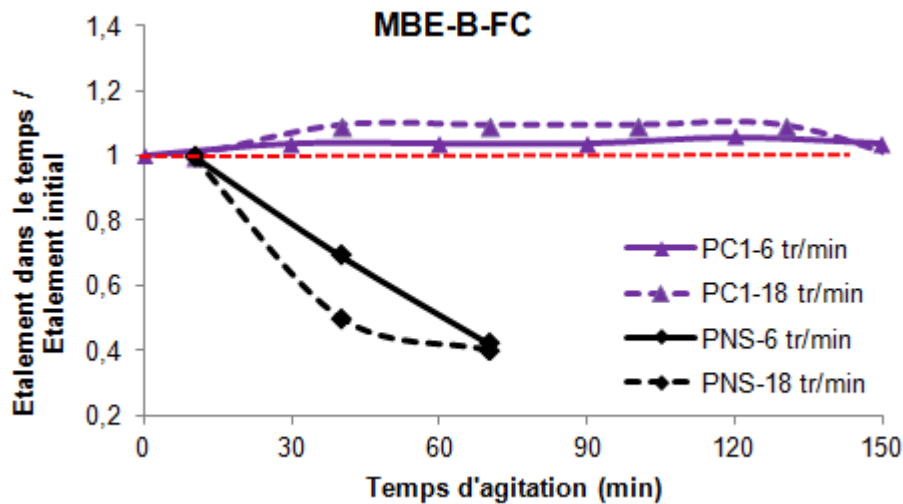


Figure 4.4 : Variation de la fluidité dans le temps du MBE-B avec FC aux différentes vitesses d'agitation

La Figure 4.3 et la Figure 4.4 présentent aussi la différence de perte de fluidité dans le temps entre deux types d'ajout cimentaire (CV et FC). Le MBE-B avec le PNS perd rapidement l'étalement dans le temps, il y a très peu de différence entre le mélange contenant des CV et celui avec le FC. Pour le MBE-B avec le PC1 qui a une meilleure rétention de la fluidité dans le temps, les différents types d'ajout cimentaire incorporé donnent une différence de fluidité dans le temps. Le MBE-B avec le FC améliore la rétention de la fluidité.

L'effet de l'agitation (la vitesse et le temps) sur la fluidité de béton a été testé pour le BSAP-I-CV avec le PC1 et PNS (Figure 4.5). Comme les mortiers correspondants, la rétention de la fluidité du BSAP-I avec le PC1 est meilleure que celle avec le PNS, la vitesse d'agitation n'a pas d'effet significatif sur la fluidité dans le temps.

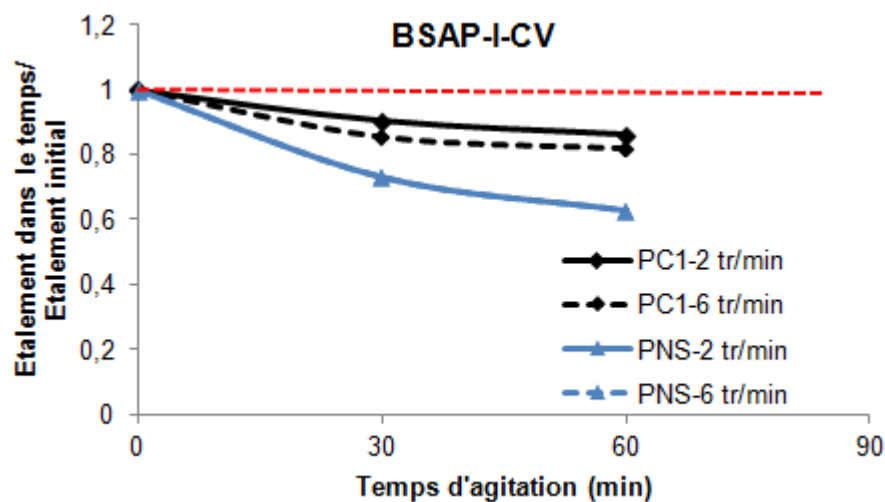


Figure 4.5 : La variation de la fluidité dans le temps de BSAP-I-CV avec le PC1 et le PNS aux différentes vitesses d'agitation

4.1.2 Effet de l'agitation dans le temps sur les propriétés rhéologiques à 22°C

Les propriétés rhéologiques initiales (seuil de cisaillement et viscosité plastique) du MBE à 22°C sont présentées dans le Tableau 4.1. Le seuil de cisaillement est lié à la fluidité des mélanges cimentaires. Pour le MBE-B (Fluidité = 260 ± 10 mm) quel que soit le type de SP et d'ajout cimentaire utilisé, le seuil de cisaillement se situe entre 5 et 25 Pa. Pour celui du MBE-I qui est moins fluide (fluidité = 210 ± 10 mm), le seuil de cisaillement est légèrement plus grand, environ 20 à 40 Pa. La viscosité plastique des MBE étudiés est quasiment identique, les valeurs sont comprises entre 2.5 et 5 Pa.s.

Tableau 4.1 : Propriétés rhéologiques initiales des MBE à 22°C

Série	Seuil τ_0 (Pa)	Viscosité μ_0 (Pa.s)
MBE-B-CV-PC1	6,2	3,8
MBE-B-CV-PNS	24,3	3,7
MBE-B-FC-PC1	14,3	2,8
MBE-B-FC-PNS	17,5	4,4
MBE-I-CV-PC1	23	5
MBE-I-CV-PNS	37,5	3,2
MBE-I-LT-PC1	41,8	4
MBE-I-LT-PNS	32,4	2,8

La Figure 4.6 montre que le seuil de cisaillement dans le temps (τ_t) avec la vitesse d'agitation à 6 tr/min augmente par rapport à la valeur initiale (τ_0). Cette augmentation est plus grande dans le MBE avec le PNS que dans le MBE avec le PC1. A 60 minutes d'agitation, le seuil de cisaillement du MBE avec le PNS peut être 6 à 12 fois plus grand que le seuil de cisaillement juste après le malaxage. Pour le MBE avec le PC1, le seuil de cisaillement à 60 minutes d'agitation, est au maximum 3 fois plus grand que le seuil initial (τ_0). L'effet du temps d'agitation sur la viscosité plastique du MBE est faible et désordonné.

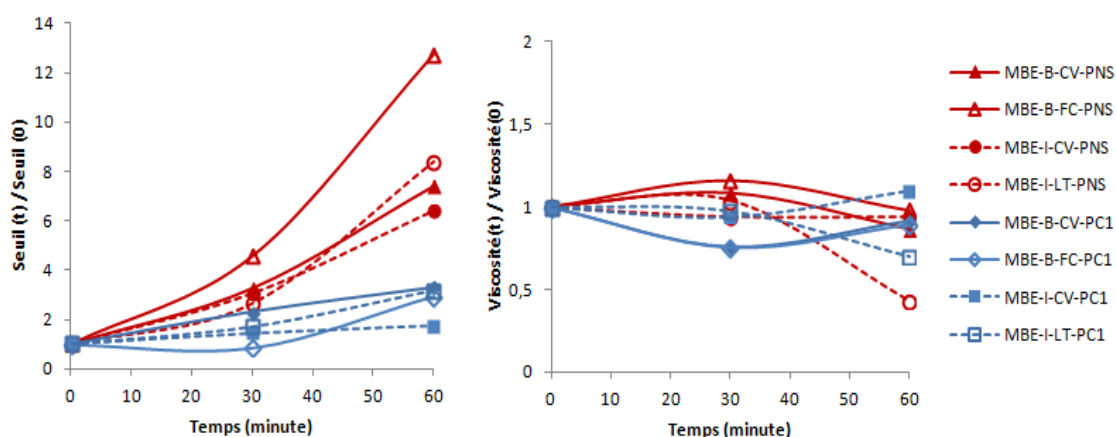


Figure 4.6 : Propriétés rhéologiques des MBE dans le temps à 6 tr/min par rapport à leurs valeurs initiales

La vitesse d'agitation dans le temps influence le seuil de cisaillement du MBE-B, mais l'effet de la vitesse d'agitation sur la viscosité plastique du MBE-B est désordonné et faible (Figure 4.7). Pour le MBE-B avec le PC1, la vitesse d'agitation normale (6 tr/min) donne un seuil plus grand que le mélange avec la vitesse d'agitation élevée (18 tr/min). Généralement, entre 0 minute et 60 minutes d'agitation, le seuil de cisaillement augmente régulièrement. Mais pour le MBE-B avec le PC1, le seuil de cisaillement après 30 minutes de la vitesse d'agitation élevée est plus petit que le seuil initial. En effet, la structure de PC1 est de type « peigne » ce qui agit par répulsion stérique et électrostatique, et a un mode d'action à long terme. Après le malaxage, il y a encore une grande quantité de PC1 dans le MBE pour améliorer la rétention de maniabilité. Cette quantité de PC1 accélère son action chimique et physique avec l'agitation, donc le seuil de cisaillement peut être plus petit que le seuil initial entre 0 et 60 minutes d'agitation. Par contre, pour le MBE-B avec le PNS, la vitesse d'agitation élevée réduit la fluidité à cause de sa molécule à structure linéaire à répulsion électrostatique qui a un mode d'action à court terme. La plupart du PNS est déjà beaucoup consommé pendant le malaxage, la vitesse d'agitation augmente la consommation de PNS et la vitesse d'hydratation, ce qui accélère l'augmentation du seuil de cisaillement.

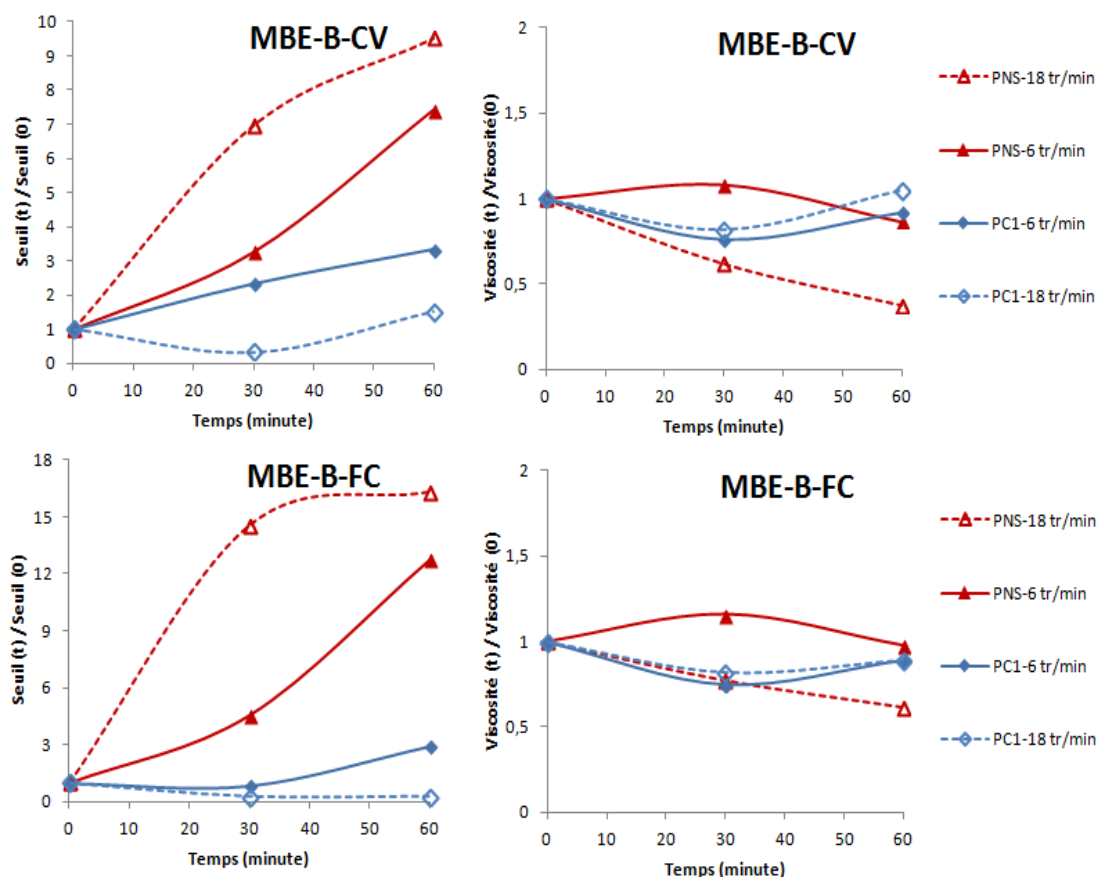


Figure 4.7 : Propriétés rhéologiques du MBE-B dans le temps par rapport leur valeurs initiales aux différentes vitesses d'agitation

Les propriétés rhéologiques initiales du BAP à 22°C sont présentées dans le Tableau 4.2. Le seuil de cisaillement est lié à la fluidité des mélanges cimentaires. Pour le BAP-B (Fluidité = 660 ± 20 mm), le seuil de cisaillement varie entre 25 et 35 Pa. Pour celui du BSAP-I qui est moins fluide (fluidité = 500 ± 50 mm), le seuil de cisaillement est légèrement plus grand, environ 80 et 100 Pa. La viscosité plastique du BSAP-I étudiées, environ 42 Pa.s, est plus grande celle de BAP-B qui se situe aux alentours de 8-9 Pa.s.

Tableau 4.2 : Propriétés rhéologiques initiales du BAP à 22°C

Série BAP	Seuil de cisaillement (Pa)	Viscosité plastique (Pa.s)
BAP-B-PC1	23	7,4
BAP-B-PNS	33,5	9,8
BSAP-I-PC1	80	41,8
BSAP-I-PNS	96	42

Comme le MBE, le seuil de cisaillement du BAP augmente aussi avec le temps d'agitation (Figure 4.8). Le seuil de cisaillement du BAP avec le PNS augmente plus rapidement dans le temps que celui du BAP avec le PC1. L'effet du temps d'agitation sur la viscosité plastique du BAP est faible et désordonné (Figure 4.9).

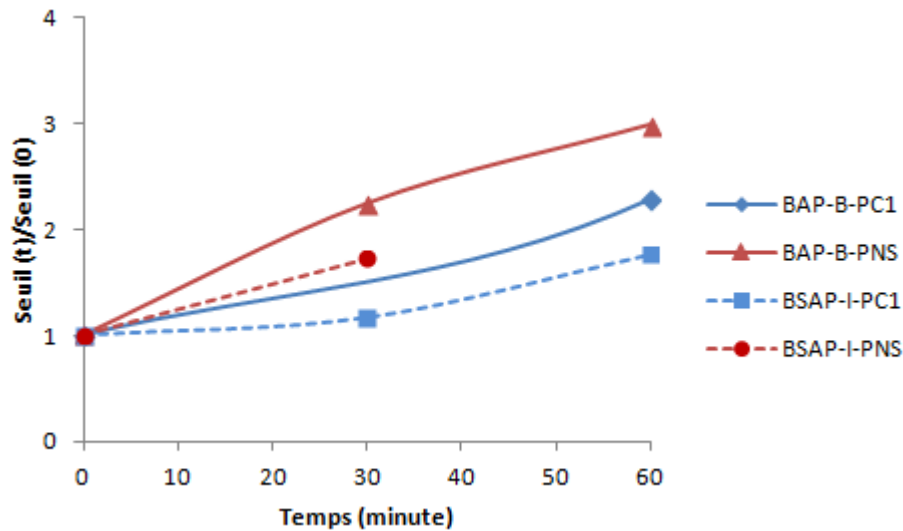


Figure 4.8 : Seuil de cisaillement dans le temps par rapport au seuil initial ($t=0$) de BAP

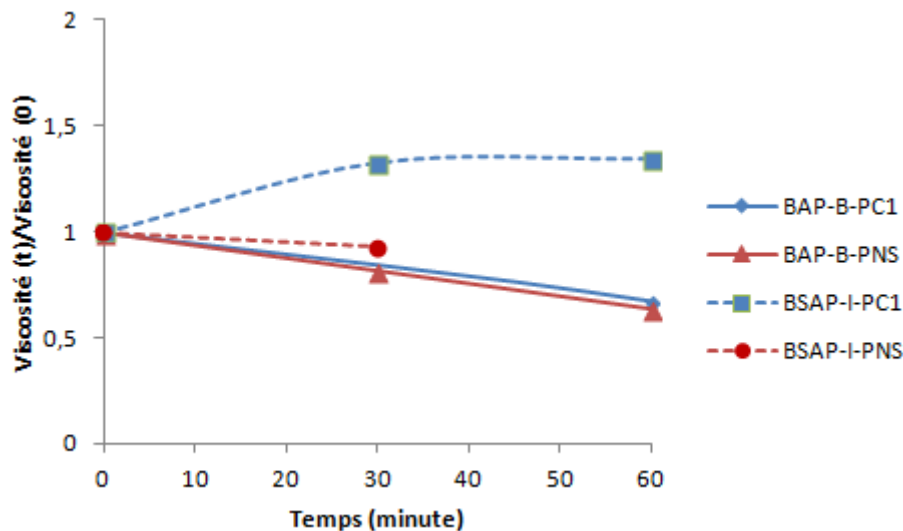


Figure 4.9 : Viscosité plastique dans le temps par rapport à la viscosité initiale ($t=0$) de BAP

4.1.3 Effet de l'agitation dans le temps sur la stabilité de la teneur en air à 22°C

Le changement de la teneur en air dans le temps pendant l'agitation a été testé sur le MBE-I et le BSAP-I contenant des CV, qui contiennent respectivement $5 \pm 1\%$ et $8 \pm 2\%$ de teneur en air initiale. La Figure 4.10 et la Figure 4.11 montrent que ce changement de la teneur en air dans le temps pour le mortier et le béton est différent selon le type de SP utilisé. Pour le MBE-I-CV avec le PNS, la teneur en air passe de 5% à 2% en 60 minutes d'agitation dans le malaxeur. Alors que pour son béton correspondant, le BSAP-I-CV avec le PNS, la teneur en air passe de 9% à 6%. Entre ce type de mortier et de béton avec le PNS, la teneur en air a la même tendance dans le temps mais avec un écart de 4%. Le changement de la teneur en air est différent dans le cas du PC1 incorporé dans le mélange cimentaire. Pour le MBE-I-CV avec le PC1, l'effet de l'agitation dans le temps est négligeable. Mais la teneur en air de son béton correspondant (BSAP-I-CV avec le PC1) passe de 8% à 6%. L'effet de l'agitation dans le temps sur la teneur en air apparaît dans le BSAP-I-CV avec le PC1 mais pas dans le MBE-I-CV avec le PC1. Ces différences entre le type de mélange cimentaire et entre le type de SP sont dues aux différents types de malaxeur utilisé et à la compatibilité entre l'AEA et le SP. L'effet de la vitesse d'agitation n'a que très peu de différence sur la teneur en air du mélange cimentaire. Le temps d'agitation est en revanche le point le plus important qui change la teneur en air.

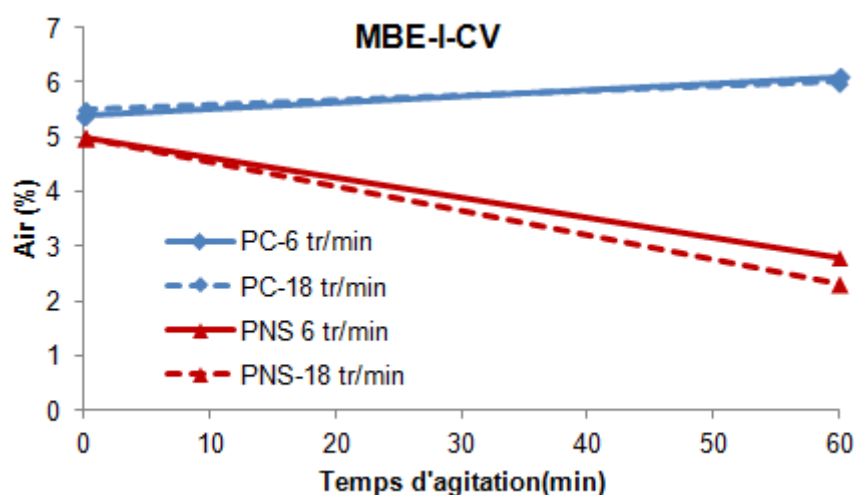


Figure 4.10 : Teneur en air dans le temps du MBE-I-CV avec le PC1 et le PNS aux différentes vitesses d'agitation

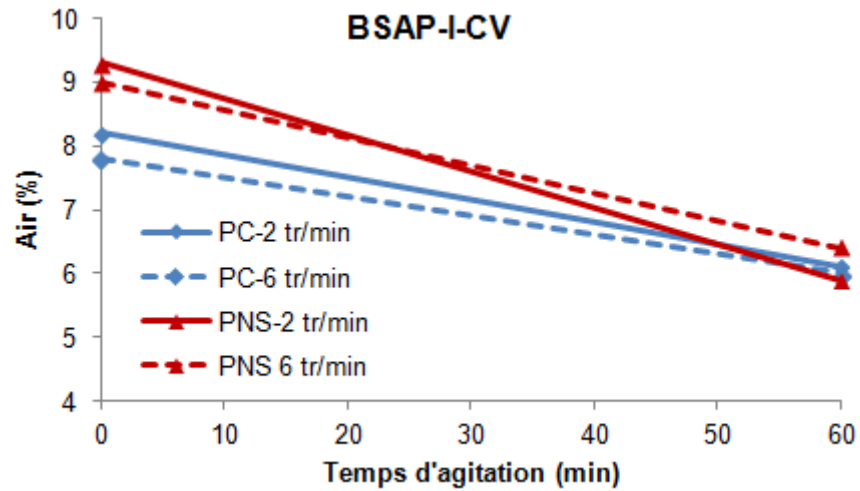


Figure 4.11 : Teneur en air dans le temps du BSAP-I-CV avec le PC1 et le PNS aux différentes vitesses d'agitation

L'effet de l'agitation dans le temps a une influence importante sur la teneur en air. Le BSAP-I a besoin de 5 à 8% d'air afin d'avoir une bonne résistance au gel/dégel, à la résistance à l'écaillage, etc. Avant le coulage, le temps de transport ou un retard de coulage du béton peut causer la perte de la teneur en air et donc diminuer la durabilité du BSAP-I. La vérification de la teneur en air avant coulage est donc nécessaire.

4.1.4 Effet de l'agitation dans le temps sur la résistance en compression à 22°C

Il n'y a pas d'effet de la vitesse d'agitation (6 et 18 tr/min) sur la résistance en compression à 1, 7 et 28 jours du MBE-B-CV qui a été coulé 70 minutes après le contact eau/ciment (Figure 4.12). En effet, pour le même MBE, la résistance en compression est liée à la teneur en air du mélange cimentaire. La teneur en air du MBE-B-CV avec le PC1 ou le PNS est inférieure de 2% car le MBE-B-CV ne contient pas d'AEA. En conséquence, l'effet de l'agitation est négligeable sur la résistance en compression.

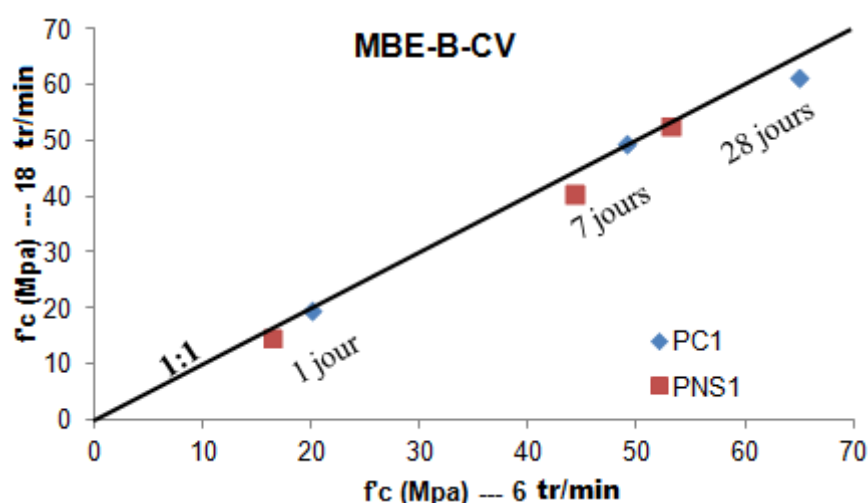


Figure 4.12 : Résistance en compression à 1, 7 et 28 jours du MBE-B-CV avec le PC1 et le PNS coulé après 60 minutes d'agitation aux différentes vitesses d'agitation

Mais pour le MBE-I-CV et le BSAP-I-CV avec le PC1 qui contient l'AEA et qui a une teneur en air initiale de 5% et 8% respectivement, l'effet de l'agitation peut influencer la teneur en air dans le temps. En conséquence, il influence aussi la résistance en compression. La Figure 4.13 et la Figure 4.14 montrent l'effet de la vitesse et de la durée d'agitation sur la résistance en compression du MBE-I-CV et BSAP-I-CV. Pour l'effet de la durée d'agitation, on compare la résistance en compression du mélange coulé juste après le malaxage et celle du mélange coulé après 60 minutes d'agitation. Pendant ces 60 minutes d'agitation, le MBE-I-CV perd de la résistance en compression mais le BSAP-I-CV en gagne légèrement. Cette différence de variation de la résistance entre le mortier et le béton est liée à la variation de la teneur en air dans le temps qui est causé par l'utilisation de différents malaxeurs comme indiqué précédemment. L'effet de la vitesse d'agitation sur

la résistance apparaît légèrement sur l'échantillon coulé à 60 minutes d'agitation car tous les mélanges ont été malaxés à la même vitesse pendant le malaxage. Si on compare la résistance du mélange coulé à 60 minutes sous une vitesse faible et sous une vitesse élevée d'agitation, l'effet de la vitesse d'agitation sur le mortier et sur le béton est inverse. Malgré tout, la variation de la résistance entre la vitesse faible et la vitesse élevée reste faible (< 5%). L'effet de la vitesse d'agitation est plus faible que l'effet de la durée d'agitation sur la résistance à 28 jours.

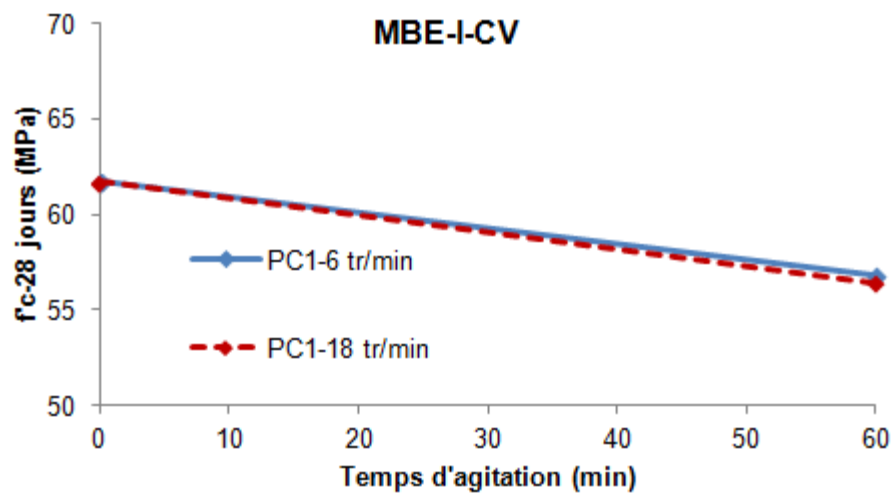


Figure 4.13 : Résistance en compression à 28 jours du MBE-I-CV avec le PC1 après 0 et 60 minutes d'agitation et aux différentes vitesses d'agitation

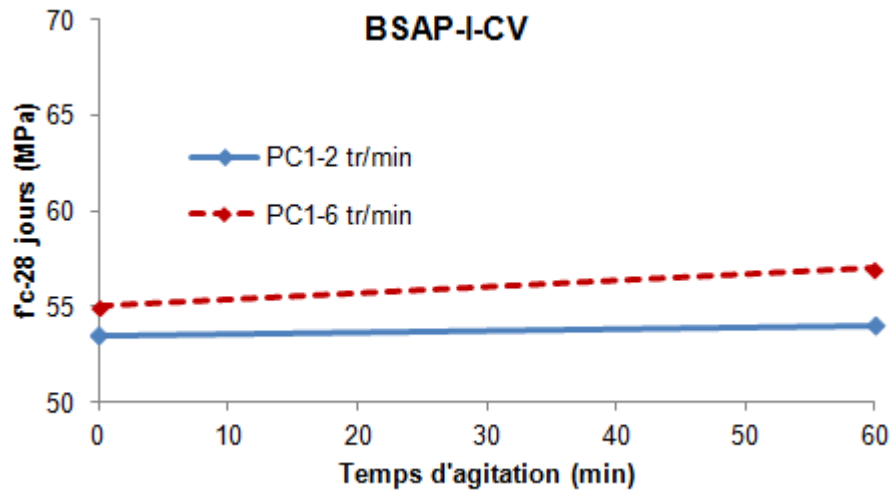


Figure 4.14 : Résistance en compression à 28 jours du BSAP-I-CV avec le PC1 après 0 minute et 60 minutes d'agitation et aux différentes vitesses d'agitation

4.1.5 Effet de l'agitation dans le temps sur le retrait au séchage et la durabilité du BSAP-I à 22°C

Des bétons différents requièrent des degrés différents de durabilité selon le milieu où on les place et les propriétés dont on veut les doter. L'effet de l'agitation dans le temps sur la durabilité de BSAP-I à 22°C est présenté par le retrait au séchage, la résistance au gel/dégel et la résistance à l'écaillage (Figure 4.15). La teneur en air et la résistance en compression du BSAP-I à 2 tr/min ou 6 tr/min d'agitation sont quasiment identiques, 6 % et 55 MPa respectivement. La durabilité des BSAP-I (2 ou 6 tr/min) sont ainsi similaires. L'effet de l'agitation dans le temps sur la durabilité à 22°C est négligeable. Les durabilités du BSAP-I à deux agitations analysées sont bonnes avec les retraits au séchage qui sont inférieurs à 800 $\mu\text{m/m}$, les facteurs de durabilité supérieurs à 80 % et les résidus de masse après l'écaillage inférieurs à 500 g/m^2 .

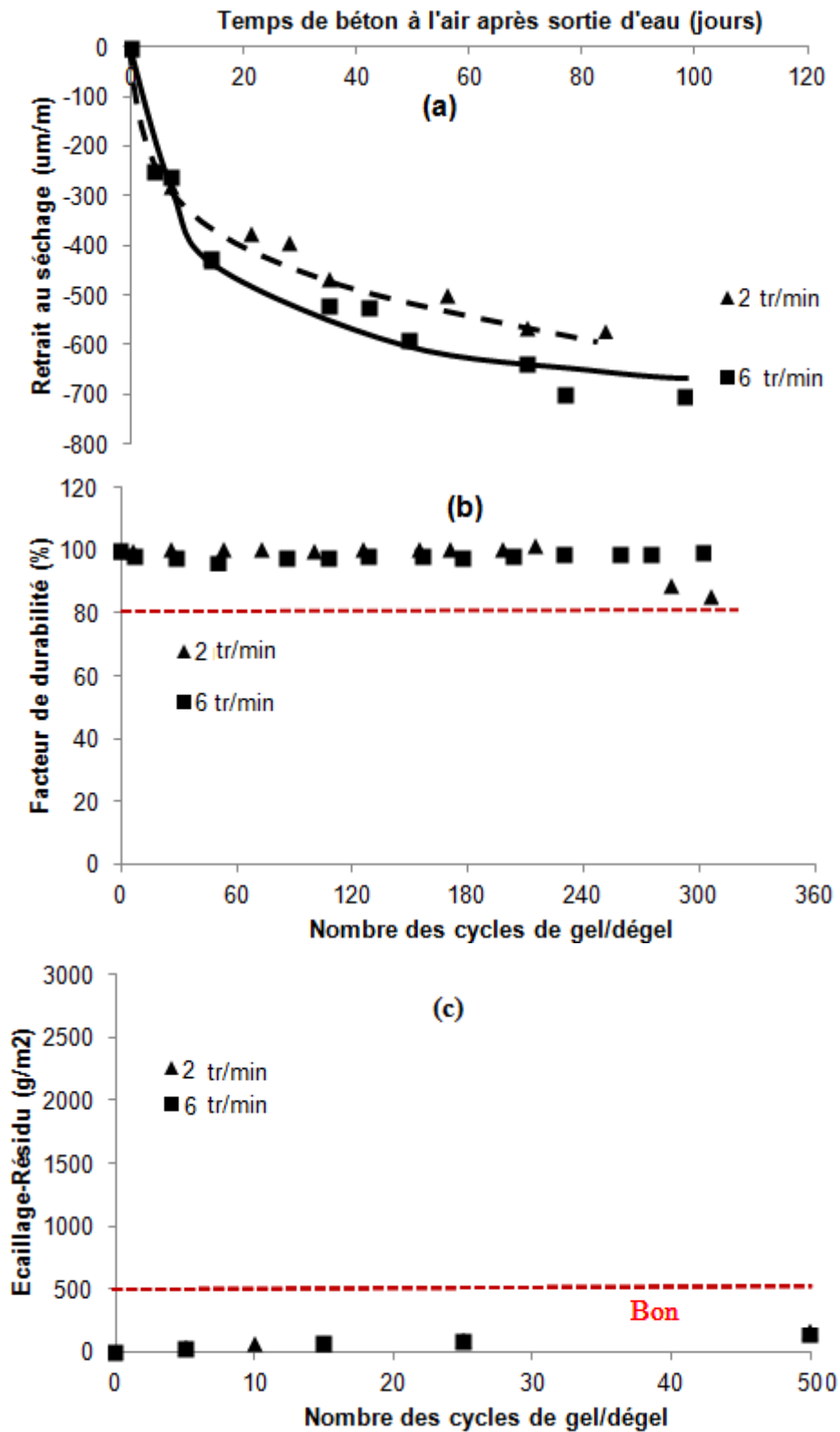


Figure 4.15 : (a) Retrait de séchage (b) Résistance au gel /dégel (c) Résistance à l'écaillage du BSAP-I à 22°C selon deux agitations différentes (2 tr/min ou 6 tr/min) avant l'échantillonnage.

4.2 Effet couplé de l'agitation et de la température sur la performance des BAP-B et BSAP-I et des mortiers correspondants

4.2.1 Effet couplé de l'agitation et de la température sur la fluidité du MBE-B

L'effet couplé de l'agitation dans le temps et de la température sur la fluidité est seulement présenté sur le MBE-B car il y a très peu d'effet de l'agitation sur la fluidité du MBE-I à 22°C comme montré dans le chapitre précédent. A cause de la difficulté de maintenir les MBE à 36°C pendant le temps d'agitation après le malaxage, l'effet couplé de l'agitation et la température a été réalisé aux températures de 8 à 29 °C avec deux vitesses d'agitation pendant deux heures ou jusqu'à ce que les MBE perdent leur fluidité.

La Figure 4.16 et la Figure 4.17 montrent l'effet couplé de l'agitation et de la température pour le MBE-B contenant des CV ou du FC respectivement. Les deux types d'ajout cimentaire incorporés dans le MBE-B donne la même tendance sur l'effet couplé de l'agitation et de la température : l'augmentation de la vitesse d'agitation provoque une augmentation de la fluidité pour le MBE-BAP-B avec le PC1, mais une perte de la fluidité pour celui avec le PNS. Cette variation de la fluidité dans le temps est plus évidente quand la température augmente.

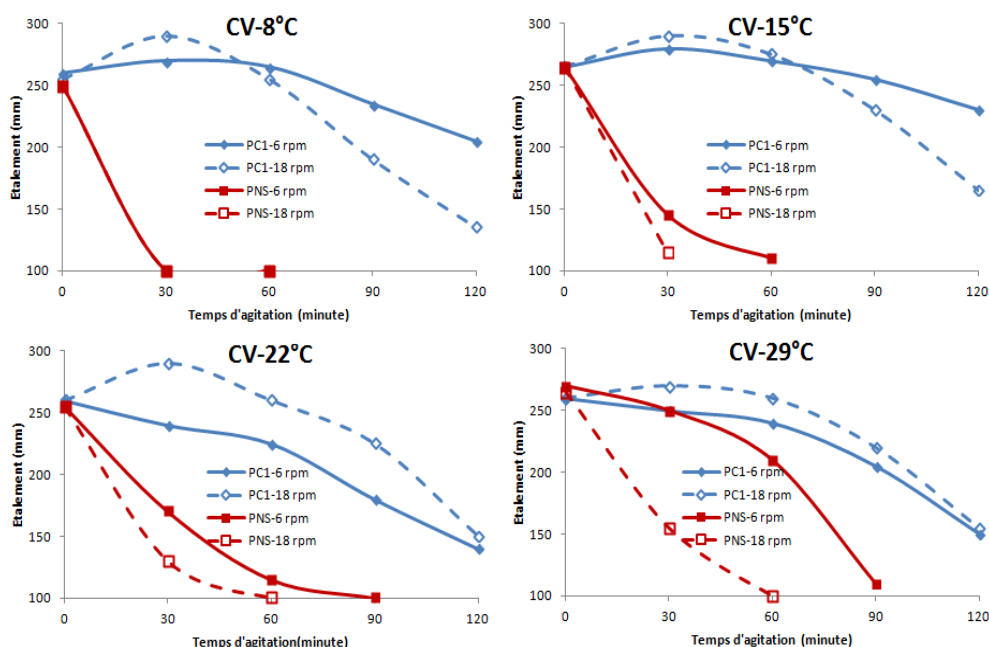


Figure 4.16 : Variation de la fluidité dans le temps du MBE-B contenant des CV aux différentes vitesses d'agitation et températures

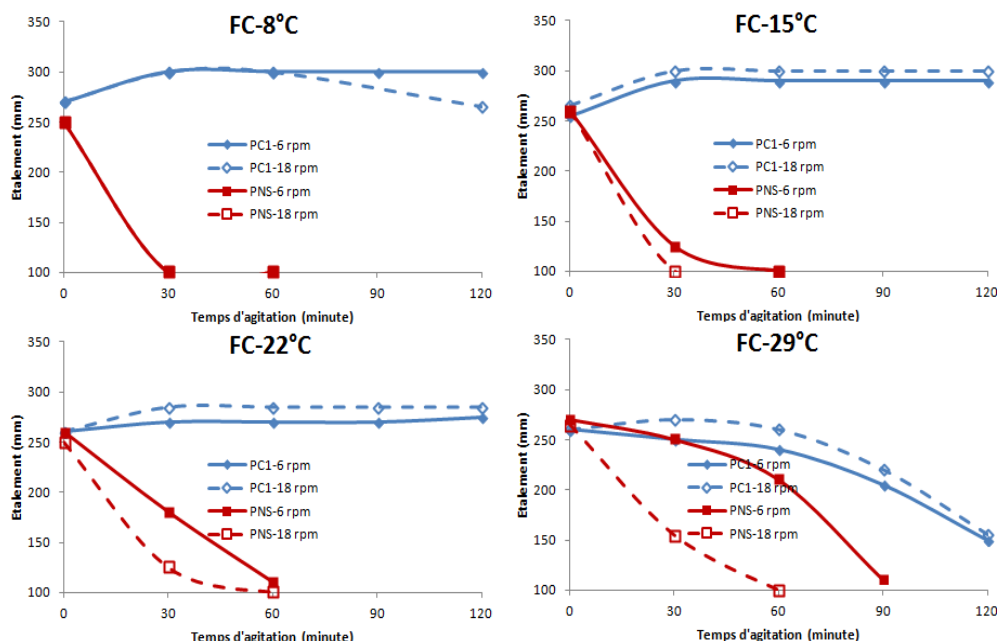


Figure 4.17 : Variation de la fluidité dans le temps du MBE-B contenant du FC aux différentes vitesses d'agitation et températures

L'effet inverse de l'agitation sur la fluidité du MBE-B avec le PC1 ou le PNS dans le temps est causé par leur propre propriété. Différentes structures et différents mécanismes d'action entre le PC1 et le PNS donnent une action à long terme pour le PC1 mais une action à court terme pour le PNS. En effet, la structure du PC1 est de type « peigne » ce qui agit par répulsion stérique et électrostatique, et a un mode d'action à long terme. La vitesse d'agitation élevée accélère le pourcentage d'adsorption de PC1 sur la surface des hydrates donc améliore la fluidité. Dans le MBE-B avec le PC1, une quantité de PC1 reste après le malaxage afin de maintenir la fluidité dans le temps. Les molécules de PC1 s'adsorbent plus facilement avec les particules de ciment avec l'augmentation de la vitesse d'agitation, donc l'étalement du MBE est amélioré. A un certain moment, l'étalement du MBE avec le PC1 à vitesse d'agitation élevée peut être plus petit que celui à vitesse faible car la consommation rapide de PC1 pendant le temps d'agitation précédent. Par contre, pour le MBE-B avec le PNS, la vitesse d'agitation élevée réduit la fluidité à cause de sa molécule à structure linéaire à répulsion électrostatique a un mode d'action à court terme. Dans le MBE-B avec le PNS, la plupart du PNS est déjà consommé pendant le malaxage, la vitesse d'agitation accélère simplement la surface d'hydrate et la vitesse d'hydratation, ce qui aide à réduire la fluidité. La variation de la température change la demande en SP et la surface spécifique des hydrates du mélange cimentaire, donc influence la fluidité après 60 minutes d'agitation.

4.2.2 Effet couplé de l'agitation dans le temps et de la température sur la perte de fluidité des MBE-B et MBE-I

La perte de fluidité (PF) à 60 minutes du MBE est présentée par l'étalement après 60 minutes d'agitation / l'étalement initial. La Figure 4.18 montre que la perte de fluidité à 60 minutes à différentes températures dépend de la composition du mélange, de la température et du type de SP utilisé. En revanche, le type d'ajout cimentaire incorporé n'influence pas la variation de la perte de fluidité à différentes températures. À 60 minutes, la fluidité est plus petite que la fluidité initiale pour le mélange avec le PNS. Cette chute de la fluidité est améliorée par l'augmentation de la température dans le MBE-B contenant des CV ou du FC. Mais l'effet de la température sur la perte de fluidité du MBE-PC1 à différentes températures est différentes que celui du MBE-PNS. Plus la température est élevée, plus la fluidité à 60 minutes du MBE-B avec le PC1 est petite, Ce phénomène n'existe pas dans le MBE-I, il y a plus de perte de la fluidité à 60 minutes du MBE-I que celle du MBE-B et la variation de la perte de fluidité selon la température est négligeable.

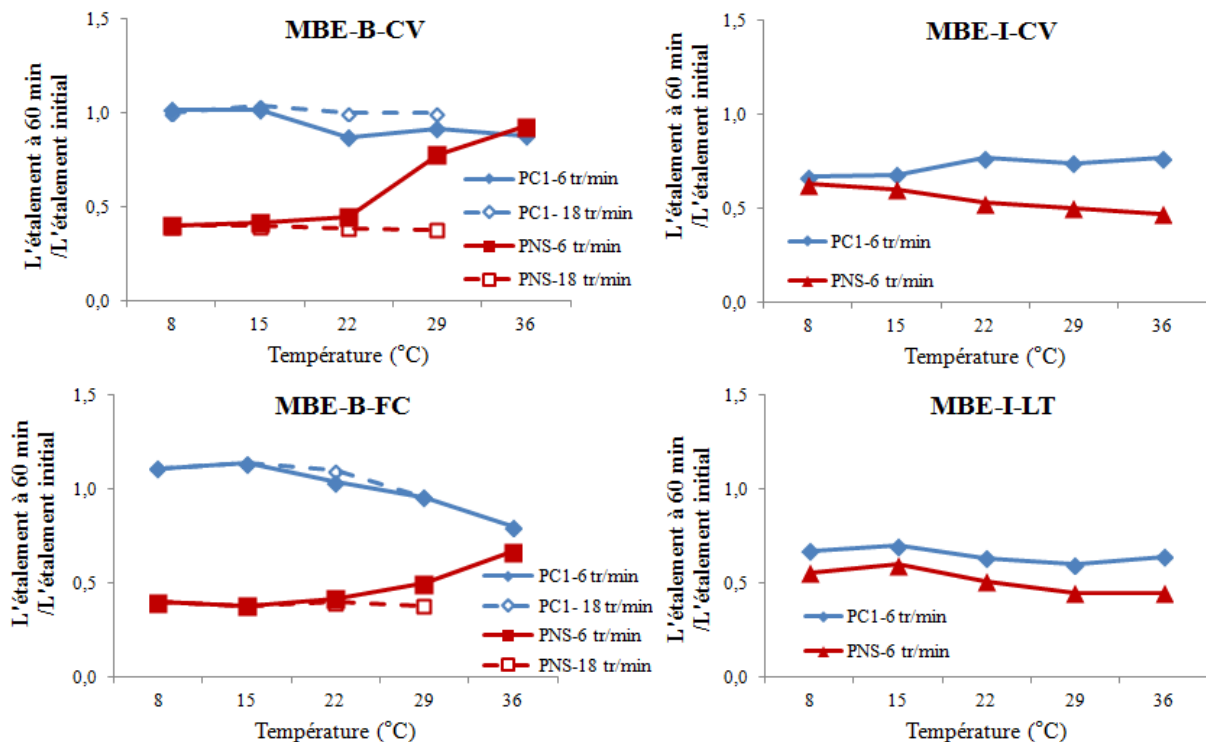


Figure 4.18 : Perte de fluidité après 60 minutes d'agitation des MBE-B et MBE-I avec deux types de SP (PC1 ou PNS) et trois types d'ajout cimentaire (CV, FC ou LT) à différentes températures

La Figure 4.19 montre la variation de la perte de fluidité des BAP-B et BSAP-I à différentes températures. La perte de fluidité à 60 minutes du béton avec le PNS est plus grande que celle avec le PC1, comme on a pu le voir sur le MBE. Mais la variation de la perte de fluidité selon la température est différente de celle du MBE. La variation de la perte de fluidité est ainsi différente entre le BAP-B et le BSAP-I. Cette différence peut être due aux différentes formulations de béton et aux quantités variables de SP incorporées dans le béton.

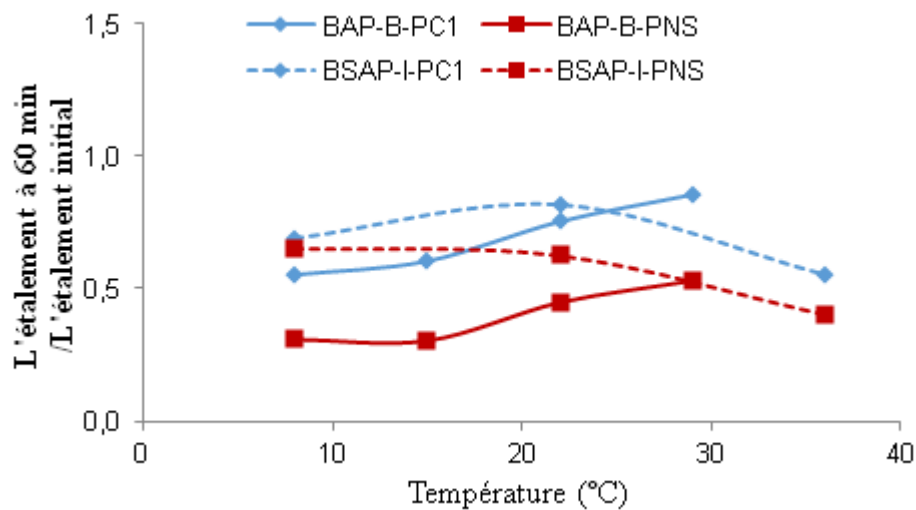


Figure 4.19 : la perte de fluidité après 60 minutes d'agitation des BAP-B et BSAP-I avec deux types de SP (PC1 ou PNS) à différentes températures

4.2.3 Effet couplé de l'agitation et de la température sur les propriétés rhéologiques des bétons et des mortiers correspondants

L'effet couplé de l'agitation et de la température sur les propriétés rhéologiques des bétons et des MBE est présenté d'abord par le rapport du seuil initial et de la viscosité initiale dans le temps sur le seuil initial et la viscosité initiale à différentes températures. Dans le temps et les différentes températures, la variation du seuil de cisaillement du MBE avec le PC1 est très complexe, elle dépend du type d'ajout cimentaire incorporé, du type de MBE et de la température qui influence le dosage en PC1 utilisé (Figure 4.20 et Figure 4.21). Alors que pour le MBE avec le PNS, le PNS% à différentes températures est quasiment identique, le seuil de cisaillement augmente régulièrement dans le temps. Le seuil de cisaillement augmente plus vite pour le MBE-B avec le PNS à température faible, mais c'est l'inverse pour le MBE-I avec le PNS.

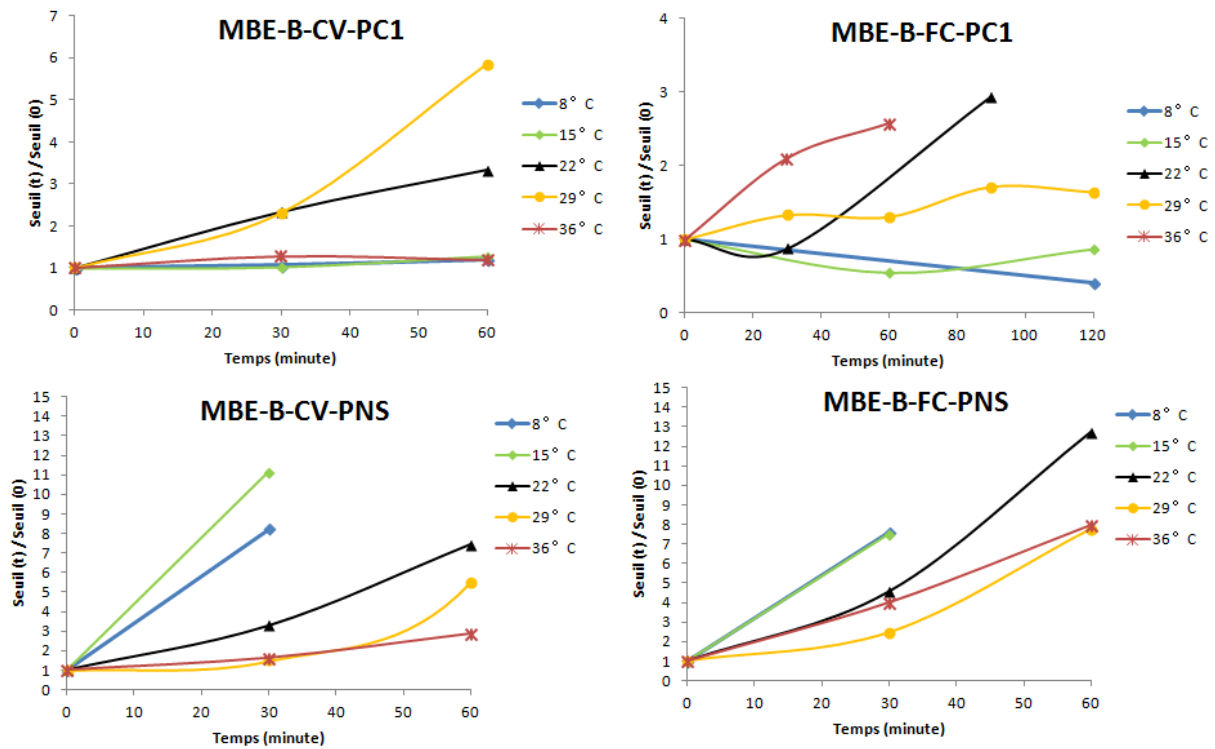


Figure 4.20 : Variation du seuil de cisailment du MBE-B dans le temps à différentes températures

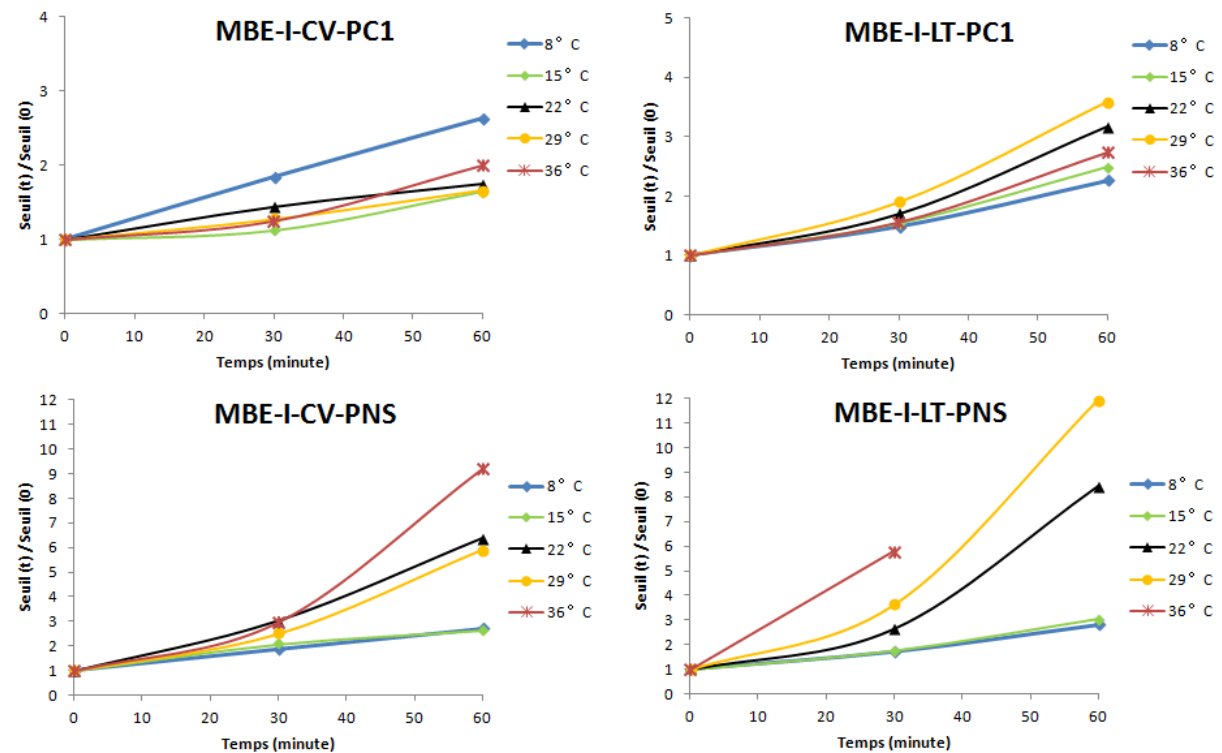


Figure 4.21 : Variation du seuil de cisailment du MBE-I dans le temps à différentes températures

Pour la viscosité plastique, l'effet couplé du temps d'agitation et la température est faible (Figure 4.22 et Figure 4.23). La variation de la viscosité plastique est faible (< 100%)

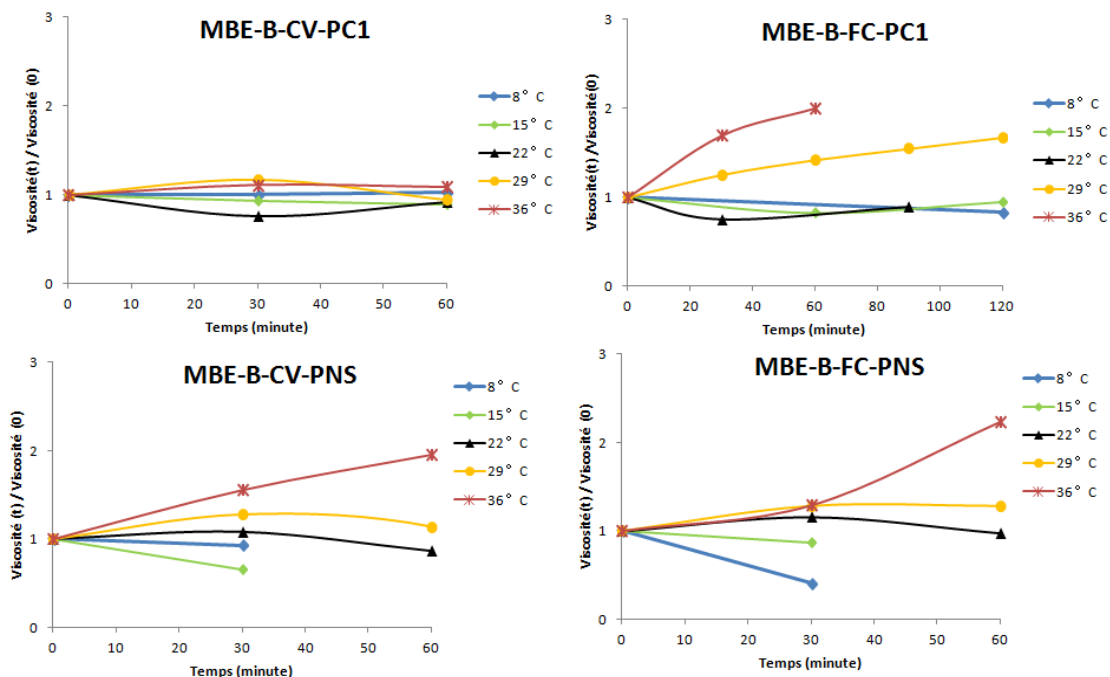


Figure 4.22 : Variation de la viscosité plastique de MBE dans le temps à différentes températures

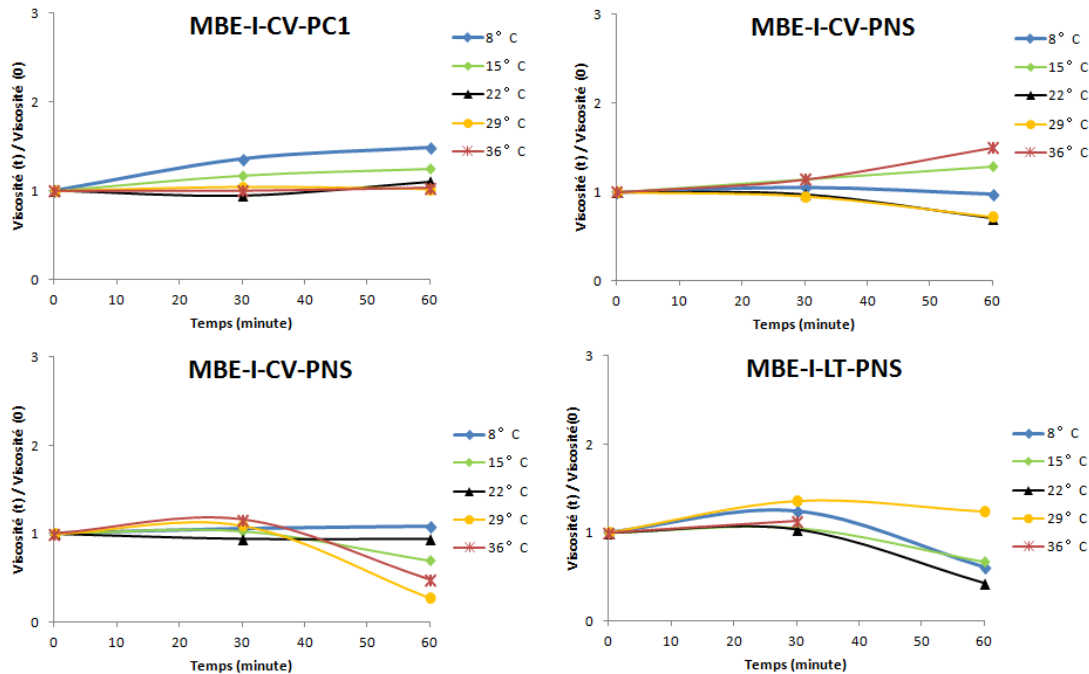


Figure 4.23 : Variation de la viscosité plastique de MBE dans le temps à différentes températures

La Figure 4.24 et la Figure 4.25 montrent l'effet couplé de la vitesse d'agitation et de la température pour le MBE-B contenant respectivement des CV ou des FC. Les deux types d'ajouts cimentaires incorporés dans le MBE-B à différentes températures donnent la même tendance sur l'effet couplé de l'agitation et de la température. L'augmentation de la vitesse d'agitation provoque une augmentation de la fluidité donc une diminution du seuil de cisaillement pour le MBE-BAP-B avec le PC1, mais une perte de la fluidité donc une augmentation du seuil de cisaillement pour celui avec le PNS. Ceci est dû à la différence de la structure et du mode action du PC1 et PNS. Plus la température est élevée, plus l'effet de la vitesse d'agitation dans le temps est important pour le MBE-B avec le PNS. L'amélioration de la fluidité qui conduit une diminution du seuil de cisaillement dure plus longtemps à température élevée pour le MBE-B avec PC1. En effet, le dosage en PC1 à la température élevée est plus important.

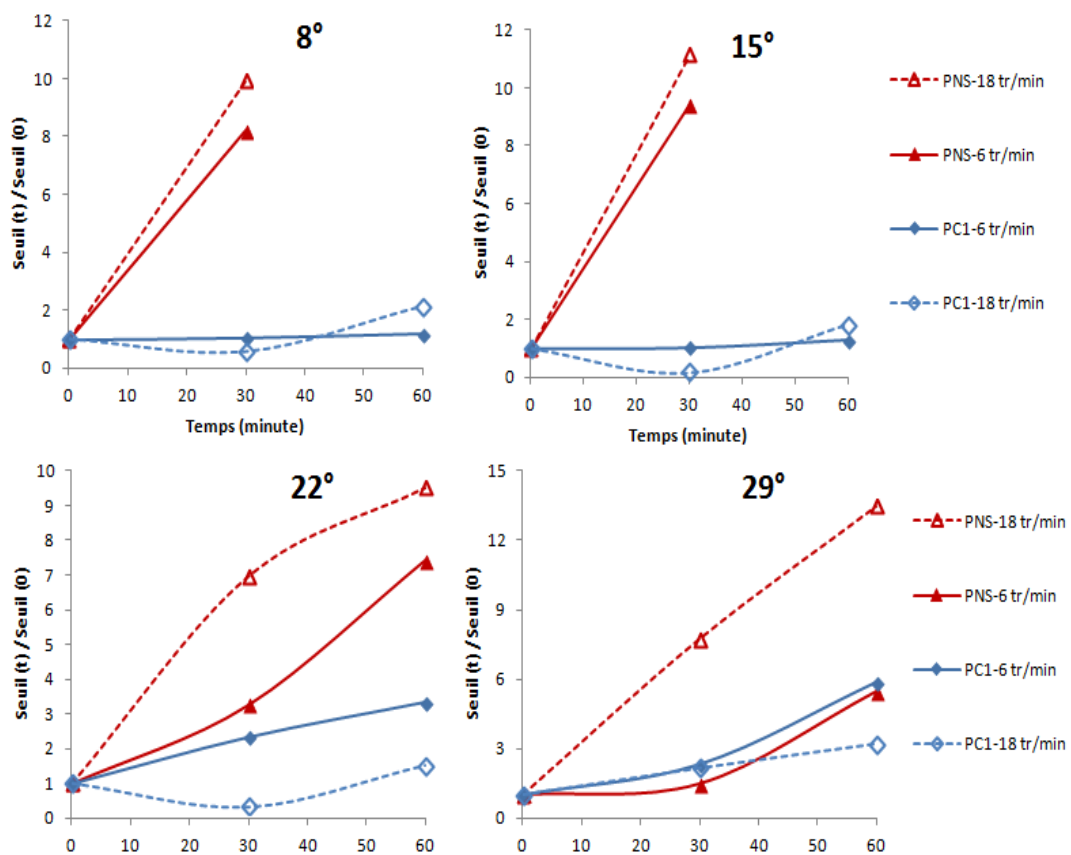


Figure 4.24 : Variation du seuil de cisaillement du MBE-B avec les CV selon deux vitesses d'agitation dans le temps à différentes températures

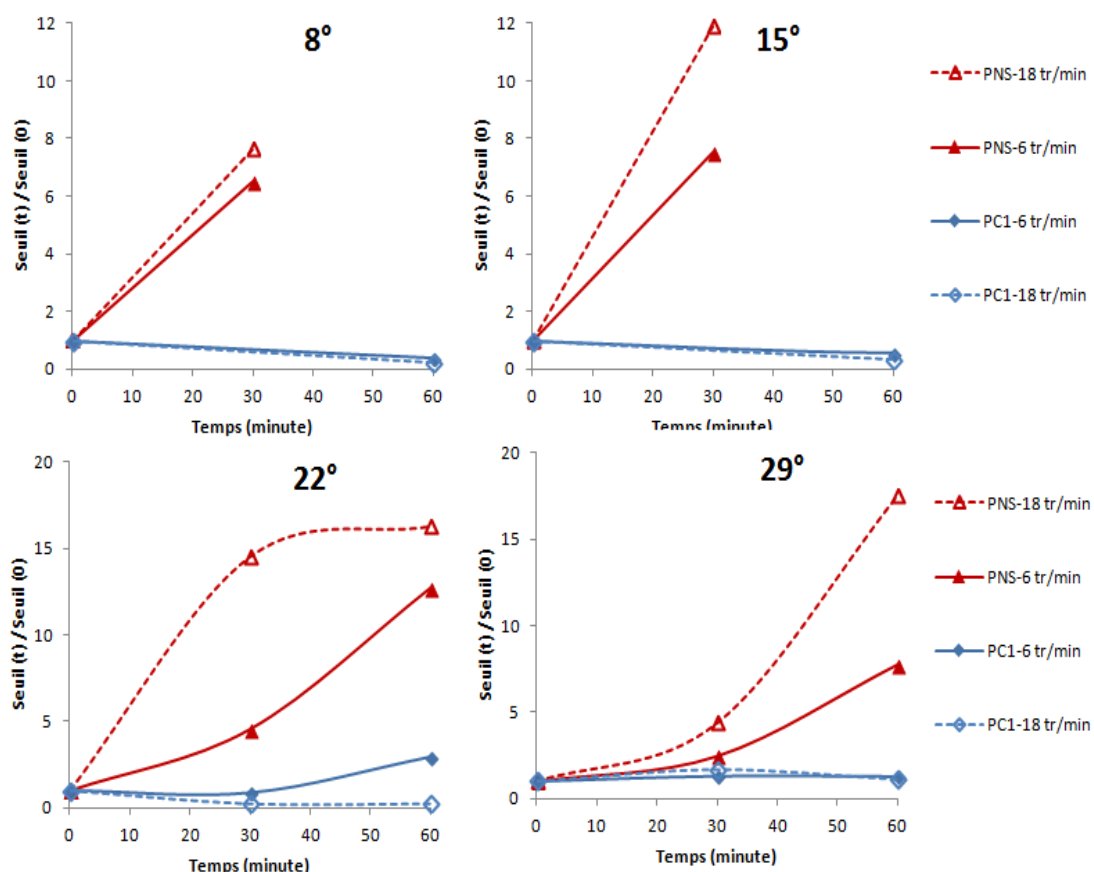


Figure 4.25 : Variation du seuil de cisaillement du MBE-B avec les FC selon deux vitesses d'agitation dans le temps à différentes températures

Concernant les propriétés rhéologiques des BAP-B et BSAP-I (Tableau 4.3 et Figure 4.26), le seuil de cisaillement du béton avec le PC1 augmente dans le temps, cette augmentation est plus importante quand la température est élevée. Le seuil de cisaillement du BSAP avec le PNS augmente dans le temps et, cette augmentation est quasiment indépendante de la température. La variation de la viscosité plastique des BAP-B et BSAP-I dans le temps à différentes températures est faible. Si on compare l'effet couplé de la température et de l'agitation dans le temps sur le MBE et le BAP, la variation de viscosité plastique est faible dans les MBE comme dans les BAP. Mais la variation du seuil de cisaillement est plus grande dans le MBE que celle dans le BAP. Le seuil de cisaillement du MBE est plus sensible aux variations externes.

Tableau 4.3 : Propriétés rhéologiques initiales des BAP-B et BSAP-I

Température (°C)	BAP-B-PC1		BSAP-I-PC1		BAP-I-PNS	
	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa,s)	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa,s)	Seuil (Pa)	Viscosité (Pa,s)
8	45	3,2	103,4	36,1	154,5	37
15	43	6				
22	23	7,4	80	41,8	96	42
29	23	8,1				
36	29,5	5,2	106	36	158	33

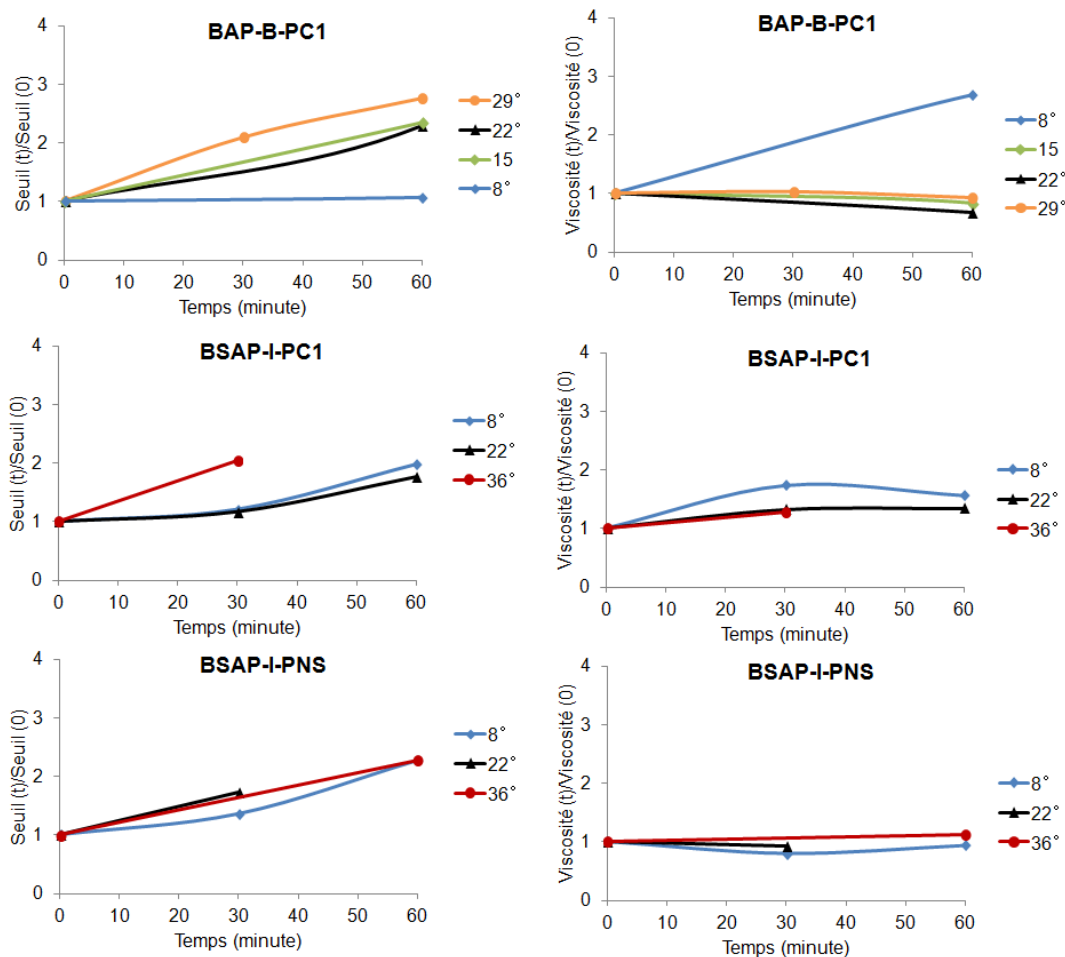


Figure 4.26 : Variation des propriétés rhéologiques du BAP-B et du BSAP-I

4.2.4 Effet couplé de l'agitation et de la température sur la teneur en air du BSAP-I et des mortiers correspondants (MBE-I)

La vitesse d'agitation n'influence pas la variation de la teneur en air pendant le temps d'agitation à différentes températures (Tableau 4.4). Après 60 minutes d'agitation, la teneur en air du mélange à une vitesse de 6 tr/min ou une vitesse de 18 tr/min est quasiment identique. La teneur en air n'est pas stable pendant l'agitation, c'est plutôt le temps d'agitation qui fait varier la teneur en air.

Tableau 4.4 : Variation de la teneur en air pendant 60 minutes pour deux vitesses d'agitation du MBE-I-CV avec le PC1

MBE-I-PC1-CV	Temps d'agitation	% Air		
		8°	22°	36°
6 tr/min	0 min	5,1	5,4	4,9
	60 min	5,7	6,1	6,8
18 tr/min	0 min	5,0	5,5	4,9
	60 min	6,0	6,0	6,6

La variation de la teneur en air après 60 minutes d'agitation (6 tr/min) est influencée par le type de SP utilisé et la composition du mélange (Figure 4.27). Dans le MBE-I avec le PC1, la teneur en air augmente avec le temps d'agitation à différentes températures, ce qui est le contraire pour celui avec le PNS, au contraire de son béton correspondant (BSAP-I). La teneur en air du MBE-I avec le PNS diminue avec le temps d'agitation à différentes températures. Ce phénomène existe aussi dans le béton correspondant (BSAP-I), mais la variation à différentes températures n'est pas la même. Il n'y a pas de régularité de variation de la teneur en air dans le temps d'agitation sur la température. La teneur en air du BSAP-I étudié dans ce projet diminue fortement après 60 minutes d'agitation, la teneur en air finale avant échantillonnage peut être inférieure à la limite d'exigence (5%). Il est important d'analyser la variation de la teneur en air avec le temps d'agitation pendant le transport du mélange afin de détecter les éventuelles anomalies sur la teneur en air envisagée.

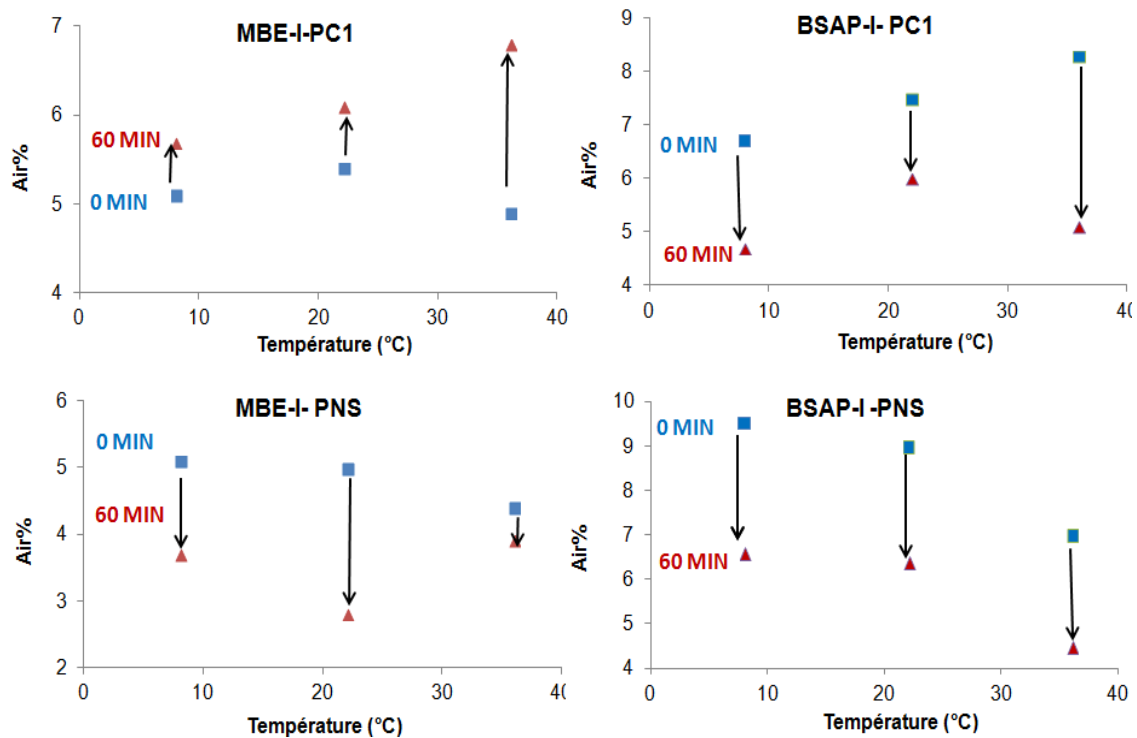


Figure 4.27 : Variation de la teneur en air après 60 minutes d'agitation (6 tr/min) du MBE-I et du BSAP-I avec deux types de SP (PC1 ou PNS) à différentes températures

4.2.5 Effet couplé de l'agitation dans le temps et de la température sur la résistance en compression du BSAP-I et du mortier correspondant (MBE-I)

Le Tableau 4.5 compare les résultats de la résistance en compression à 28 jours du MBE-I-CV avec le PC1 coulé juste après le malaxage (0 min) ou après 60 minutes d'agitation avec deux vitesses différentes (6 ou 18 tr/min). On remarque que la résistance en compression diminue avec le temps d'agitation (60 min) à différentes températures quelle que soit la vitesse d'agitation utilisée. En effet, la vitesse d'agitation ne change pas la résistance en compression, c'est plutôt le temps d'agitation qui fait varier la résistance en compression. Pendant le même temps d'agitation, deux vitesses d'agitation différentes utilisées (6 ou 18 tr/min) provoquent pratiquement la même variation sur la résistance en compression.

Tableau 4.5: Résistance en compression à 28 jours du MBE-I-CV avec le PC1 coulé juste après le malaxage ou après 60 minutes d'agitation avec deux vitesses différentes

MBE-I-PC1	Temps d'agitation	f_{c28} (MPa)		
		8°C	22°C	36°C
6 tr/min	0min	59,9	61,7	51,3
	60min	57	56,8	48,8
18 tr/min	0min	59,9	61,7	51,3
	60min	56,5	56,4	49,3

Avec une vitesse d'agitation normale de 6 tr/min pendant 60 minutes, la teneur en air varie, ce qui influence la résistance en compression à 28 jours du MBE-I et du BSAP-I (Figure 4.28 à Figure 4.31). La variation de la résistance en compression à 28 jours du mélange est liée à la variation de la teneur en air influencée par le temps d'agitation. Ce phénomène existe à différentes températures. D'ailleurs, la température élevée provoque une faible réduction de la résistance en compression à 28 jours du mélange coulé à 0 minute ou après 60 minutes d'agitation. Cette réduction de la résistance est causée par l'accélération de l'hydratation et la microstructure poreuse du mélange cimentaire à température élevée (36°C).

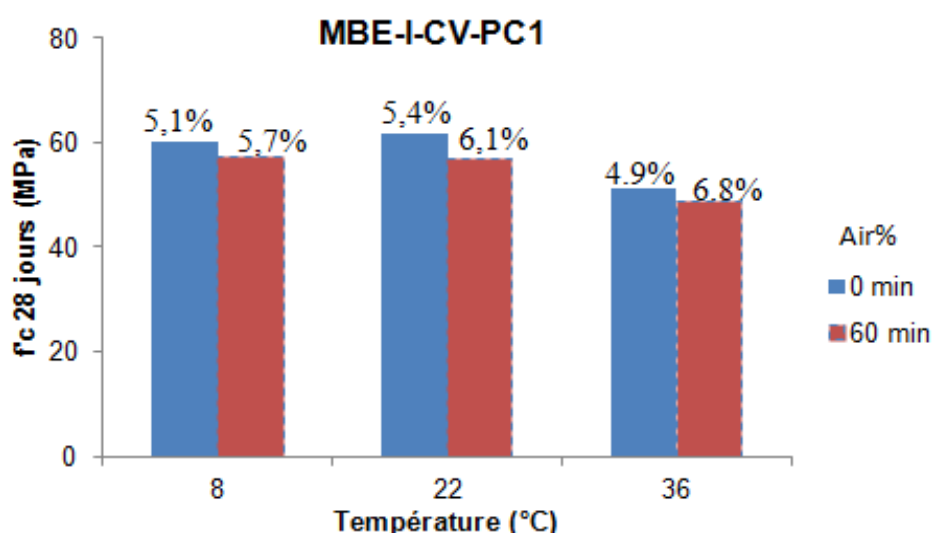


Figure 4.28 : Résistance en compression à 28 jours et teneur en air du MBE-I à la vitesse de 6 tr/min et à différentes températures

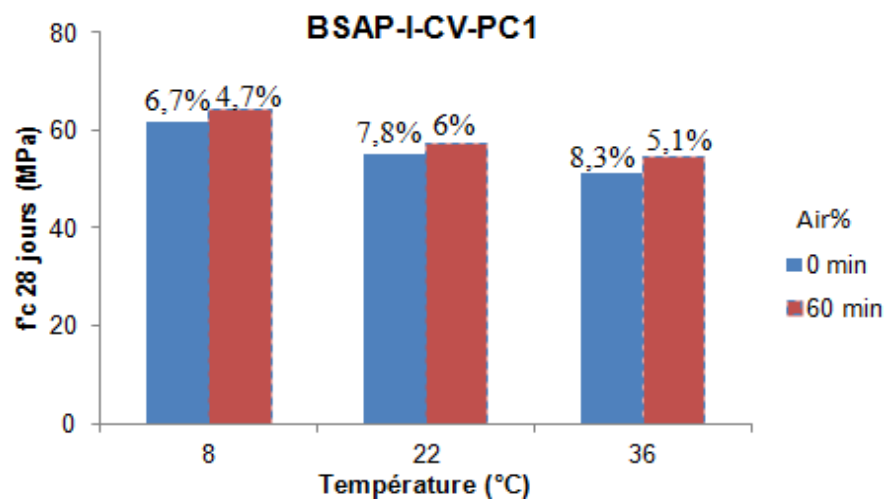


Figure 4.29 : Résistance en compression à 28 jours la teneur en air du BSAP-I à la vitesse de 6 tr/min et à différentes températures

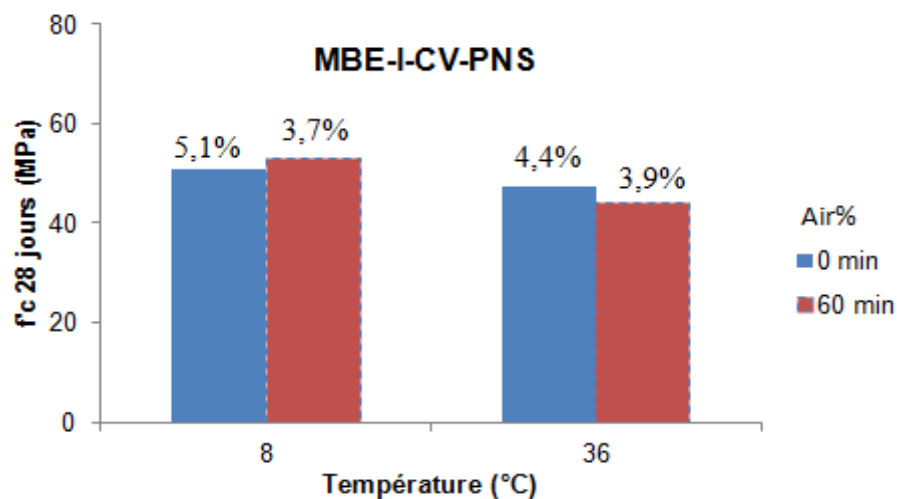


Figure 4.30 : Résistance en compression à 28 jours et teneur en air du MBE-I à la vitesse de 6 tr/min et à différentes températures

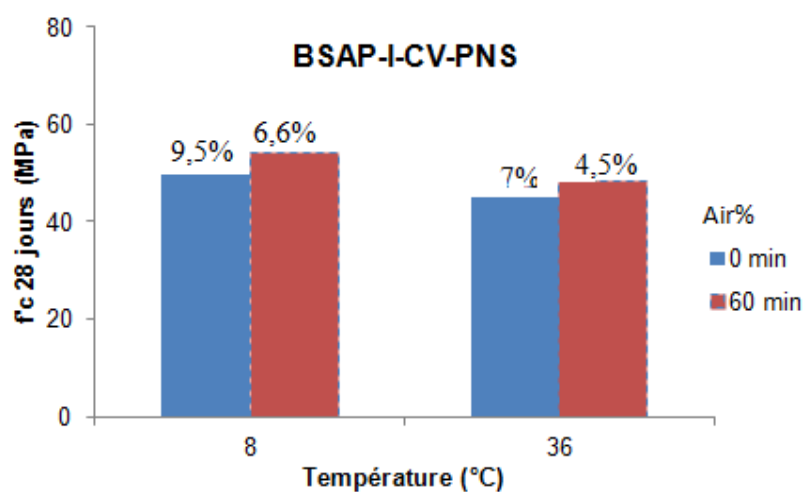


Figure 4.31 : Résistance en compression à 28 jours et teneur en air du BSAP-I à la vitesse de 6 tr/min et à différentes températures

Conclusion :

L'objectif visé dans cette partie d'étude était de connaître l'effet de l'agitation et l'effet couplé de l'agitation et de la température sur la performance des bétons autoplaçants pour le bâtiment ou la préfabrication et des bétons semi-autoplaçants pour les infrastructures et leurs mortiers correspondants. Deux types de SP (PC1 et PNS) et trois types d'ajout cimentaire (CV, FC et LT) sont incorporés dans ces bétons et mortiers et testés aux différentes agitations et températures.

Les résultats montrent que :

- La fluidité du mélange cimentaire diminue avec le temps d'agitation. Cette diminution est beaucoup plus rapide avec l'incorporation de PNS que celle de PC1. L'incorporation d'ajouts cimentaires (CV ou FC) dans le MBE-B maintient la même tendance de l'effet de l'agitation sur la fluidité.
- La fluidité est influencée par la vitesse d'agitation quand le mélange est très fluide, contenant une grande quantité de SP (MBE-B). L'incorporation de PC1 et PNS provoque un effet inverse de la vitesse d'agitation sur la fluidité. La vitesse d'agitation élevée du MBE-B avec le PC1 améliore la fluidité mais celle avec le PNS diminue la fluidité.
- La même tendance de l'effet de l'agitation sur la fluidité du MBE-B apparaît à différentes températures. la température élevée aide à développer cet effet sur la fluidité.
- L'effet couplé de l'agitation et la température sur la perte de fluidité est très variable selon le type de SP et la composition de mélange analysé.
- Le seuil de cisaillement augmente dans le temps pour la plupart des MBE et des BAP. Cette augmentation est plus faible quand la température est élevée pour le MBE-B-PNS. Mais pour le MBE-I-PNS, celle-ci est plus faible quand la température est faible.
- L'effet couplé de la température et le temps d'agitation sur le seuil du MBE-B et du MBE-I avec le PC1 est complexe car il dépend de différents paramètres (ajouts, type de MBE). Le seuil de cisaillement du MBE-B avec le PC1 peut malgré tout diminuer dans le premier temps après le malaxage.
- L'effet de la vitesse d'agitation sur le seuil de cisaillement de MBE-B avec le PC1 ou avec le PNS est opposé. Plus la vitesse augmente, plus le seuil de cisaillement

du MBE-B avec le PC1 diminue dans un premier temps. Avec l'augmentation de la température, cette diminution dure plus longtemps. Pour le MBE-B avec le PNS, la vitesse d'agitation conduit à une augmentation du seuil de cisaillement. Plus la température est élevée, plus cette augmentation est importante.

- Le seuil de cisaillement des BAP-B et BSAP-I augmente dans le temps. L'effet couplé de la température et de l'agitation sur le seuil de cisaillement de BSAP-I-PNS est négligeable. Le seuil de cisaillement des BAP-B-PC1 et BSAP-I-PC1 augmente dans le temps et avec l'augmentation de la température.
- La viscosité plastique des MBE et des BAP ne varie que très peu en fonction du temps, de la vitesse d'agitation et de la température.
- La teneur en air des MBE-I et BSAP-I diminue avec le temps d'agitation sauf pour le MBE-I avec le PC1. L'effet de la vitesse d'agitation sur la stabilité de la teneur en air est négligeable. La température n'a pas d'influence sur la teneur en air pendant l'agitation.
- La résistance en compression des MBE-I et BSAP-I est influencée par le temps d'agitation et la teneur en air de mélange. La vitesse d'agitation donne un effet négligeable. La température élevée diminue légèrement la résistance.
- La durabilité du BSAP-I ne doit pas être influencée par le temps et la vitesse d'agitation étant donné que la teneur en air finale et la résistance en compression à 28 jours sont similaires. Dans ce projet, la durabilité satisfaisait bien aux conditions requises.

Chapitre 5 Modélisation

5.1 Prédiction des propriétés des BAP par leurs mortiers correspondants (MBE) avec la méthode MBE

Chaque fabrication de béton a besoin de beaucoup de matériaux, d'énergie et de temps pour tester l'effet d'ajouts, d'adjuvants ou d'environnement sur l'évolution de la performance du béton. Il est intéressant d'utiliser la méthode basée sur la pâte ou le mortier pour simplifier et accélérer les analyses de béton. La méthode de mortier de béton équivalent (MBE) remplace les granulats du béton par des sables (Schwartzentruber et Catherine, 2000). Il existe une bonne relation entre le béton conventionnel et le MBE sur l'affaissement, la quantité de SP, la teneur en air, la résistance en compression, etc. (Assaad et al., 2009). Concernant le béton autoplaçant (BAP), Erdem a aussi trouvé une bonne corrélation entre le MBE et ses BAP correspondants sur le seuil de cisaillement, la viscosité plastique, et la thixotropie (Erdem et al., 2010). Est-ce que la méthode MBE peut être appliquée pour le BAP à différentes températures ? Est-ce que les autres propriétés du BAP peuvent aussi être prédites par la méthode MBE ? Ce chapitre vise à établir des modèles pour prédire les propriétés (fluidité, demande en SP ou AEA, teneur en air, prise initiale, flux maximal et résistance en compression) des BAP-B et BSAP-I par ces mortiers correspondants MBE-B et MBE-I à différentes températures.

Erdem a donné une équation pour prédire la relation entre l'étalement du BAP et celui du mortier correspondant (MBE) (Erdem et al., 2010) :

Équation 5.1 :
$$r = \frac{V_{BAP}}{A_{BAP}^{*}(D_{max})_{BAP}} = \frac{V_{MBE}}{A_{MBE}^{*}(D_{max})_{MBE}}$$

V_{BAP} : le volume de béton contenu dans le cône d'Abrams (5495 cm³).

A_{BAP} : l'aire de la surface sur laquelle s'étale le béton.

$(D_{max})_{BAP}$: le diamètre du plus gros gravillon pour le béton.

V_{MBE} : le volume de mortier contenu dans le mini cône (287 cm³).

A_{MBE} : l'aire de la surface sur laquelle s'étale le mortier.

$(D_{max})_{MBE}$: le diamètre maximum du sable.

Dans notre travail, tous les MBEs ont été analysés avec l'étalement initial calculé par l'équation précédente. L'étalement initial des MBE-B et MBE-I était de 260 et 210 mm qui correspondait à l'étalement initial demandé des BAP-B et BSAP-I de 660 et 500 mm respectivement. La comparaison de différentes propriétés entre les bétons et les mortiers correspondants a été réalisée dès que l'étalement a répondu à l'exigence juste après le malaxage.

5.1.1 Fluidité et variation de la fluidité

L'étalement initial des bétons (BAP-B et BSAP-I) et des mortiers correspondes (MBE-B et MBE-I) juste après le malaxage (0 min) a bien répondu à l'équation donnée par Erdem (Erdem et al., 2010), comme montré dans la Figure 4.2. Les étalements de BAP-B (660 ± 20 mm) correspondaient bien à ceux des MBE-B (260 ± 10 mm) de ces et les étalements de BSAP-I (500 ± 50 mm) correspondaient bien à ceux des MBE-I (210 ± 10 mm). Il est intéressant de connaître l'étalement après 60 minutes d'agitation et aux différentes températures afin de vérifier l'évolution de sa fluidité et maniabilité après une durée d'attente ou de transport. Les différentes températures et les types de SP incorporé peuvent faire varier la variation de la fluidité à 60 minutes d'agitation. Mais il y avait aussi une relation entre l'étalement des bétons et des MBEs. Équation 5.2 et la Figure 4.2 peuvent prédire l'étalement après 60 minutes d'agitation du béton par celui de MBE.

Équation 5.2 : $\text{Etalement}_{(\text{béton})} = 2 \times \text{Etalement}_{(\text{MBE})}$ $R^2 = 0,8$

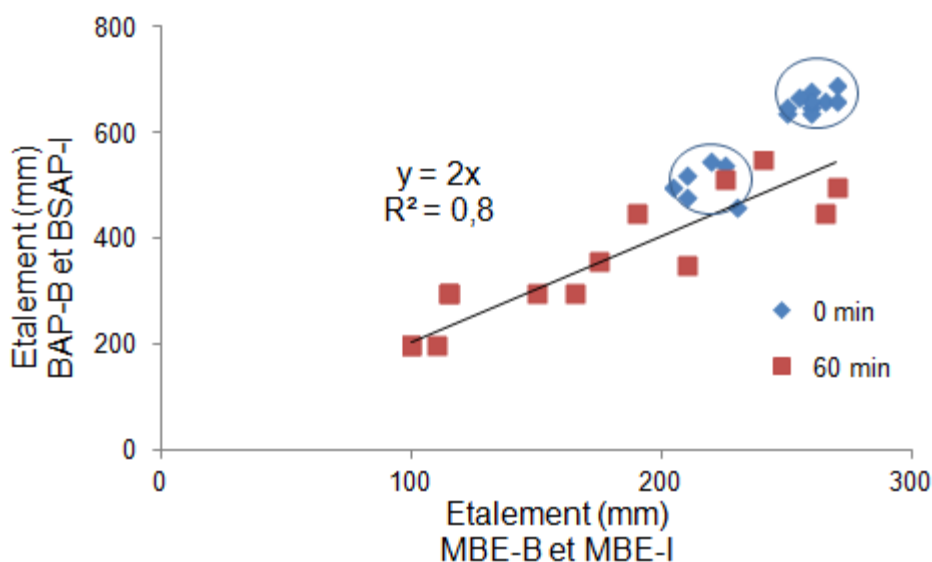


Figure 5.1 : Relation entre l'étalement des BAP-B et BSAP-I et des MBE-B et MBE-I.

5.1.2 Demande en SP

La corrélation entre la demande en SP des BAP-B et BSAP-I et celle des MBE-B et MBE-I à différentes températures pour atteindre une même consistance est présentée dans la Figure 5.2. L'étalement du béton et l'étalement du MBE correspondant est calculé par l'Equation 5.3. La demande en SP est presque identique dans le béton et le MBE correspondant sauf pour le BAP-B avec le PNS et son MBE. Ces derniers types de BAP-B contiennent de grosses quantités de PNS et ont demandé 20 % en plus de PNS que pour les MBE correspondants (MBE-B-PNS) pour atteindre la fluidité désirée. Le dosage de PC1 utilisé dans le MBE-B et le MBE-I peut s'appliquer directement dans le BAP-B et le BSAP-I, autant que le dosage de PNS utilisé dans le MBE-I et le BSAP-I. Cependant le dosage de PNS utilisé dans le BAP-B est 1,14 fois plus important que celui dans le MBE correspondant (MBE-B). Les différences de dosage entre le MBE et le béton peuvent être causées par la quantité élevée de PNS et la présence de gravier dans le béton qui augmente la friction interne et la collision entre les particules solides. Une équation avec une bonne corrélation ($R^2 = 0,95$) existe entre la demande en SP de MBE et celle de béton, présenté comme suit :

$$\text{Équation 5.3 : } SP_{(\text{béton})} = 1,14 \times SP_{(\text{MBE})} \quad R^2 = 0,95$$

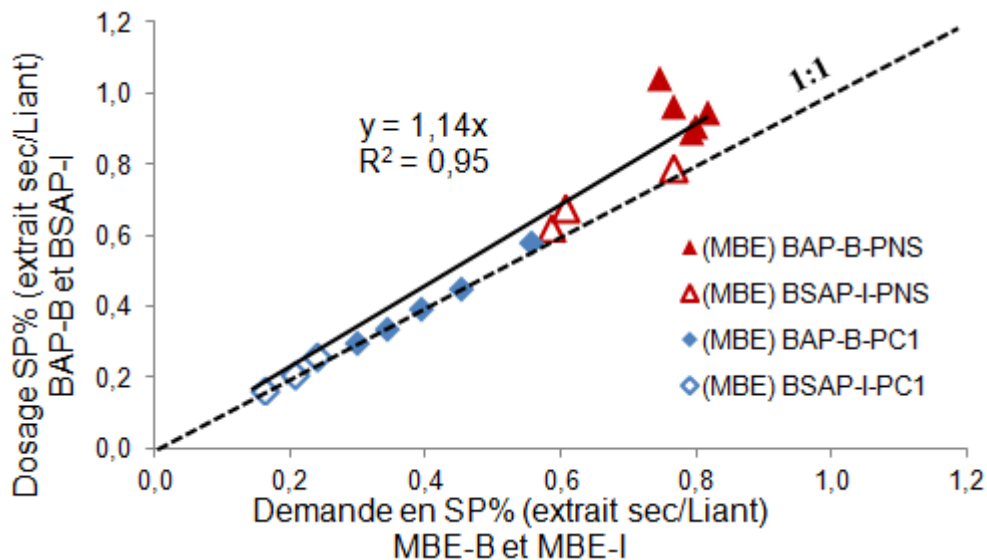


Figure 5.2 : Relation entre la demande en SP des BAP-B et BSAP-I et des MBE-B et MBE-I.

5.1.3 Teneur en air

La teneur en air de béton a été testée selon la norme ASTM C 231 qui permet de déterminer la quantité d'air contenu dans le béton frais (8 L) avec une pompe de pression manuelle intégrée. La teneur en air de MBE a été calculée par le poids de MBE réel dans un récipient 400 ml et le poids de MBE théorique selon la norme ASTM C185. La Figure 5.3 montre que : la teneur en air augmente avec la diminution de la température dans le MBE-B ou le BAP-B qui ne contient pas l'AEA. Quand la teneur en air de MBE-B mesuré par l'ASTM C231 augmente, celle du BAP-B mesuré par l'ASTM C185 augmente en même temps. La teneur en air de béton et le MBE n'a pas dépassé 5% sans AEA. Avec l'incorporation de l'AEA, la teneur en air de béton et le MBE augmente. 5 à 8 % de la teneur en air est demandé dans le BSAP-I afin d'avoir une bonne durabilité (gel/dégel, écaillage, etc.). La teneur en air du MBE correspondant (MBE-I) est $5 \pm 0,5$ % quand le dosage en AEA utilisé est identique à celui dans le BSAP-I qui a la teneur en air $8 \pm 1,5$ %. La teneur en air du BSAP-I est plus grande que celle de MBE-I quand la demande en AEA est identique. La quantité de gravillon ajouté et l'efficacité de l'AEA dans les différents types de malaxeur utilisés peuvent causer la différence de teneur en air entre le MBE et le BAP.

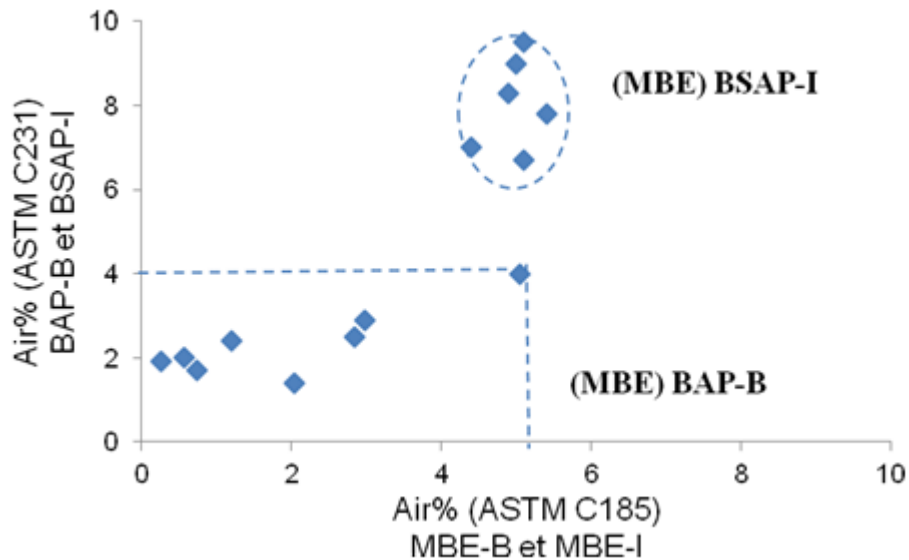


Figure 5.3 : Relation entre la teneur en air des BAP-B et BSAP-I et des MBE-B et MBE-I.

La teneur en air du BSAP-I de 5 à 8 % correspond à la teneur en air du MBE-I de 5 %. La demande en AEA est identique dans le BSAP-I et dans le MBE-I afin d'avoir la teneur en air désirée (Figure 5.4). La demande en AEA est influencée par le type de SP incorporé dans le mélange. Quand l'AEA est combiné avec le PNS dans le mélange cimentaire, la demande en AEA pour avoir la même teneur en air est plus grande que celui combiné avec le PC1. Ce phénomène existe dans le béton et dans le MBE.

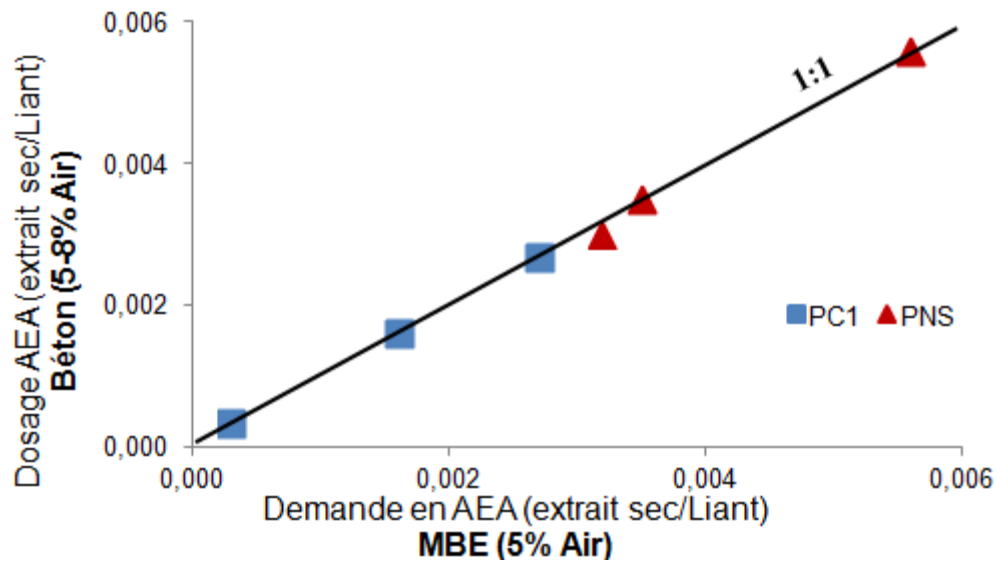


Figure 5.4 : Relation de la demande en AEA entre le BAP-B et BSAP-I et le MBE-B et MBE-I.

5.1.4 Propriétés rhéologiques

Les propriétés rhéologiques initiales (le seuil de cisaillement initial et la viscosité plastique initiale) du MBE et du béton ont été testé par les Rhéomètres ConTec 4 et 5 respectivement. Le principe de la méthode de mesure est le même, mais le volume du béton est plus grand. Le seuil de cisaillement et la viscosité plastique du MBE-B entre 10 et 20 Pa et 3 et 6 Pa.s correspond au seuil de cisaillement et la viscosité plastique du BAP-B entre 30 et 50 Pa et 3 et 10 Pa.s. D'autre part, le seuil de cisaillement du MBE-I est plus grand que celui du MBE-B entre 40 et 50 Pa, le seuil de cisaillement du BSAP-I étant également plus grand entre 90 et 150 Pa. Mais pour la viscosité plastique du MBE-I entre 2 et 6 Pa.s, la viscosité plastique de BSAP-I est plus élevée, environ 40 Pa.s. La corrélation entre le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des bétons et des MBE correspondants est présentée dans la Figure 5.5 et la Figure 5.6.

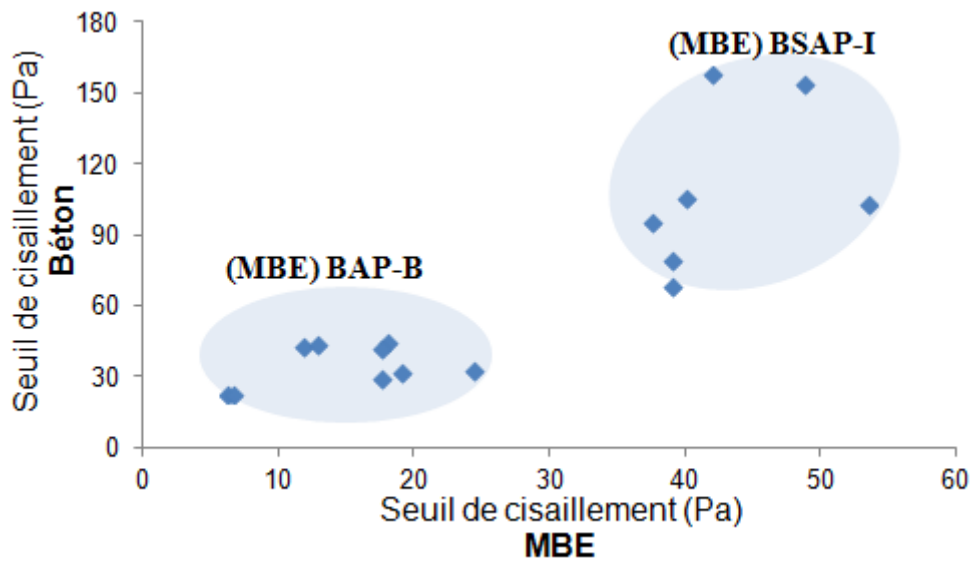


Figure 5.5 : Relation du seuil de cisaillement initial entre le BAP-B et BSAP-I et le MBE-B et MBE-I.

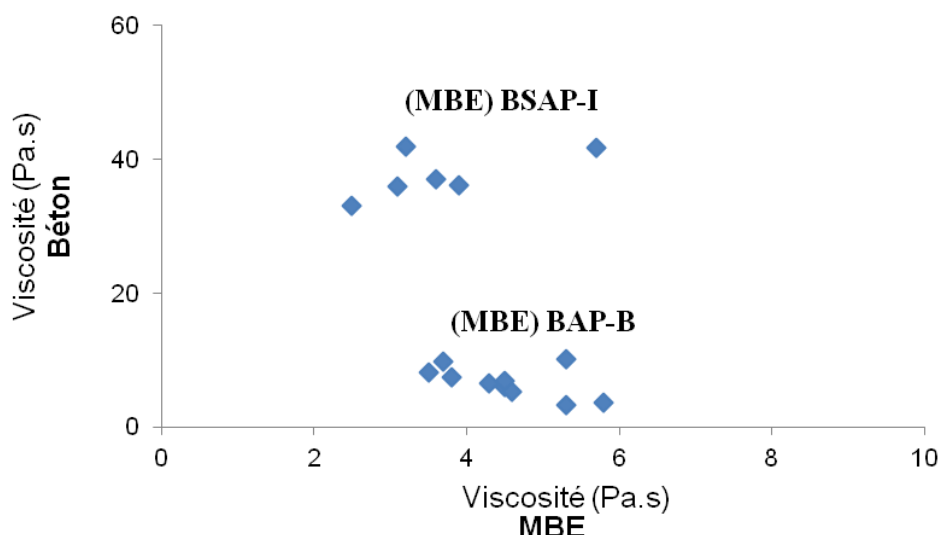


Figure 5.6 : Relation de la viscosité plastique initiale entre le BAP-B et BSAP-I et le MBE-B et MBE-I.

5.1.5 Début de prise et flux maximal

Le début de prise et le flux maximal par gramme de ciment du BAP-B et du MBE-B ont été mesurés sur le même calorimètre isotherme mais les épaisseurs d'échantillon étaient différentes, 3 et 6 cm pour le MBE-B et le BAP-B respectivement. La corrélation de la prise initiale et du flux maximal entre le BAP-B et le MBE-B sont illustrées dans les Figure 5.7 et Figure 5.8. Il y a une bonne relation entre le BAP-B et le MBE-B pour ces deux propriétés de mélanges cimentaires testés par le même calorimètre isotherme, comme montré dans l'Équation 5.4 et l'Équation 5.5. De bonnes corrélations sur le début de prise et le flux maximal avec des valeurs de $R^2 = 0,93$ et de $R^2 = 0,98$ ont été obtenues, ce qui permet de prédire les résultats sur BAP-B à partir de l'analyse sur MBE-B.

$$\text{Équation 5.4 : Début de prise}_{(BAP-B)} = 0,92 \times \text{Début de prise}_{(MBE-B)} \quad R^2 = 0,93$$

$$\text{Équation 5.5 : Flux maximal}_{(BAP-B)} = 1,1 \times \text{Flux maximal}_{(MBE-B)} \quad R^2 = 0,98$$

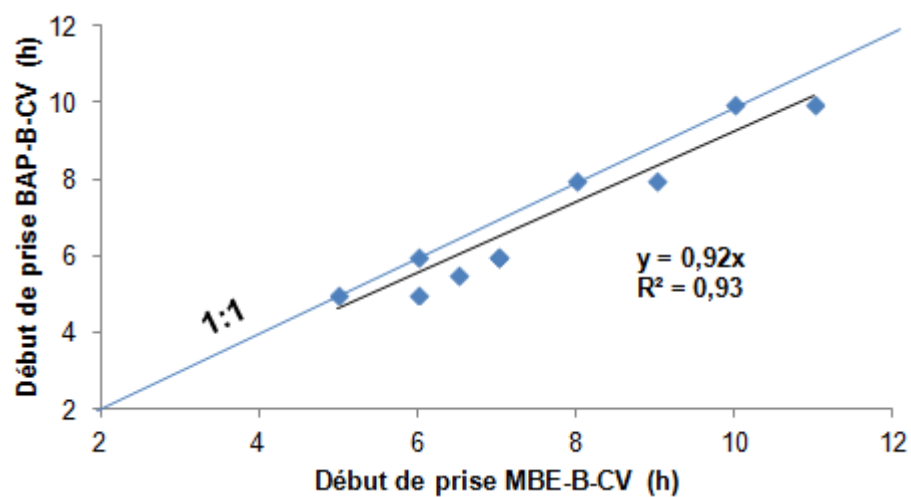


Figure 5.7 : Relation du début de prise entre le BAP-B et le MBE-B

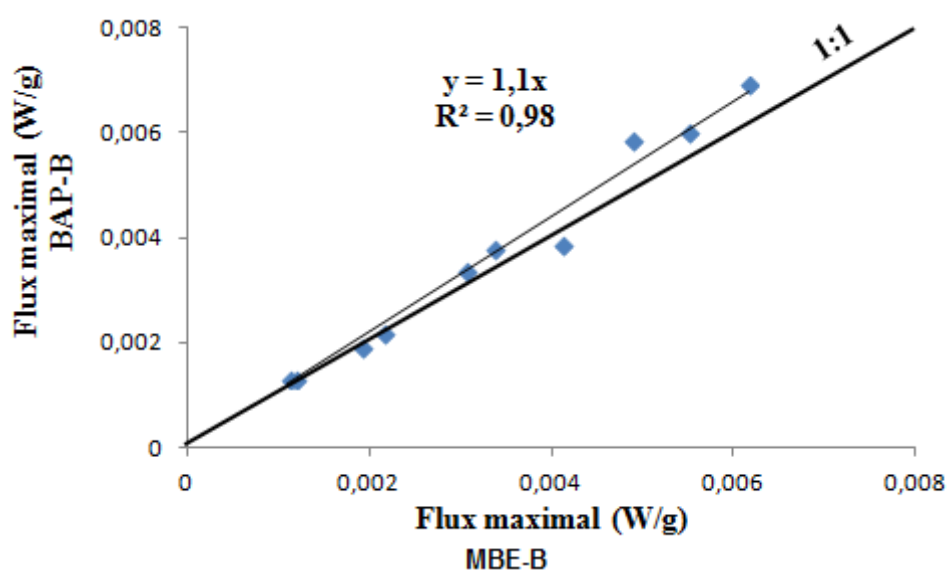


Figure 5.8 : Relation du flux maximal entre le BAP-B et le MBE-B

5.1.6 Résistance en compression

La résistance en compression sur béton (BAP-B et BSAP-I) a été mesurée sur des cylindres (160 * 320 mm et 100 * 200 mm) selon la norme ASTM C39. Généralement, la résistance en compression du béton obtenue à 28 jours par des essais de compression sur des éprouvettes cubiques (20 cm x 20 cm x 20 cm) est 1,2-1,25 fois plus grande que celle de béton réalisée sur des éprouvettes cylindriques de dimensions normalisées (160 * 320 mm). Dans cette thèse, la résistance en compression des MBE a été mesurée sur les cubes de dimensions 40³ mm³ et 50³ mm³ pour le MBE-B et le MBE-I respectivement selon la norme ASTM C109. La corrélation de la résistance en compression à 1 et 28 jours entre le béton mesurée sur cylindre et le MBE mesuré sur cube est représentée sur la Figure 5.9 et la Figure 5.10. Différentes tailles d'échantillon de MBE comparé avec le béton en même taille de cylindre donnent les équations suivantes (Équation 5.6 et Équation 5.7). Les valeurs de la résistance en compression de MBE-B en cube 40³ mm³ sont plus grandes que celles de BAP-B en cylindre ($f'c_{(MBE)} = 1,5 f'c_{(BAP-B)}$). Alors, les valeurs de la résistance en compression de MBE-I en cube 50³ mm³ sont quasiment identiques à celles du BSAP-I. La résistance en compression d'un béton conventionnel (éprouvette cylindre 100 * 200 mm) est quasiment identique à la résistance en compression du MBE correspondant (éprouvette cube 50³ mm³) (Assaad et al., 2009). La différence est causée par l'effet d'échelle. Les résultats obtenus le sont à titre indicatif compte tenu que la composition et la forme, notamment l'élancement de l'échantillon (rapport hauteur sur largeur), a une influence non négligeable sur les résultats obtenus. L'influence de la teneur en air sur la résistance en compression est faible. Parce que la teneur en air du BSAP-I est 8 ± 2 % qui correspond celle du MBE-I à 5 ± 1 %. Alors que la teneur en air de BAP-B est quasiment identique à celle du MBE-B (Figure 5.3).

Peu importe quelle échelle d'échantillon utilisé, la relation de la résistance en compression entre le béton et le MBE est toujours avec une corrélation linéaire forte et un R^2 supérieur de 0,95, indiquant la prédiction de la résistance en compression de béton en cylindre par celle de MBE en cube.

$$\text{Équation 5.6 : } f_{c(BAP-B)} = 0,62 \times f_{c(MBE-B 40^3 \text{ mm}^3)}$$

$$R^2 = 0,93$$

$$\text{Équation 5.7 : } f_{c(BSAP-I)} = 1,03 \times f_{c(MBE-I 50^3 \text{ mm}^3)}$$

$$R^2 = 0,97$$

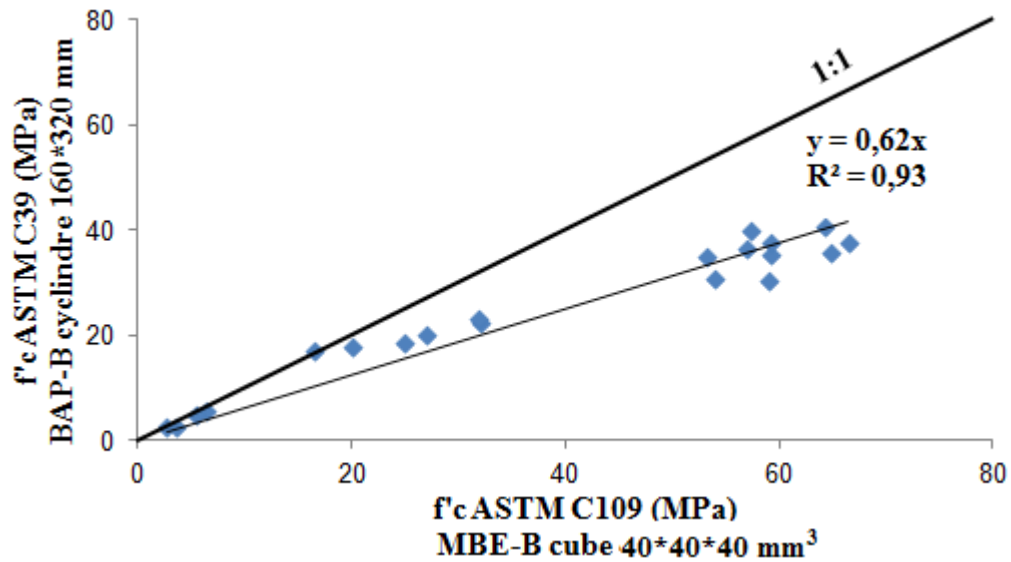


Figure 5.9 : Relation de la résistance en compression entre le BAP-B avec les cylindres 160*320 mm et le MBE-B avec les cubes 40*40*40 mm³

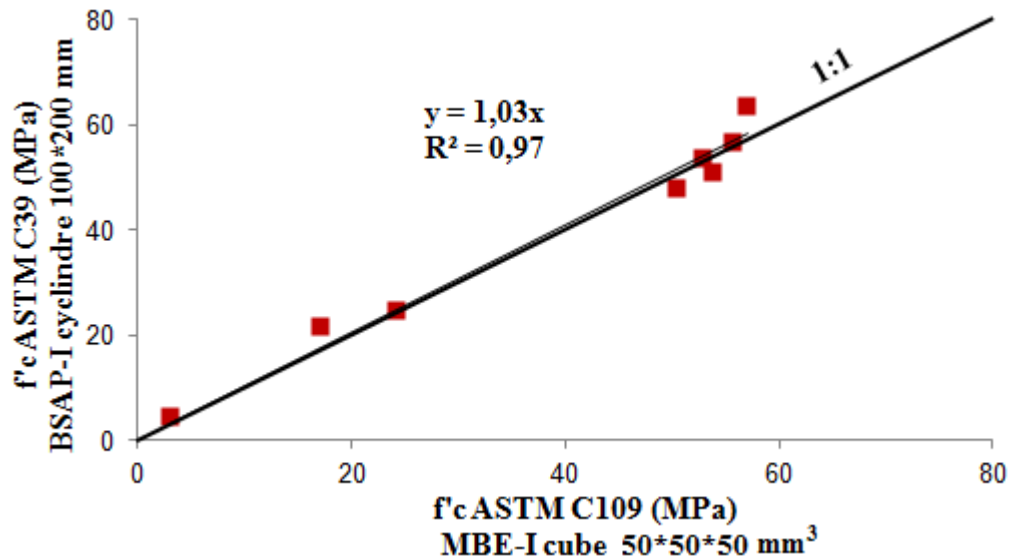


Figure 5.10 : Relation de la résistance en compression entre le BSAP-I avec les cylindres 100*200 mm et le MBE-I avec les cubes 50*50*50 mm³

5.1.7 Conclusion :

Le but visé dans cette partie d'étude était de valider la performance des BAP-B et BSAP-I par l'utilisation de la méthode MBE à différentes températures. Avec les données obtenues, il est intéressant de trouver que l'analyse des propriétés mesurées sur MBE peut prédire la fluidité, la demande en SP ou AEA, la teneur en air, le seuil de cisaillement, la viscosité plastique, le début de prise, le flux maximal et la résistance en compression des BAP-B et BSAP-I.

Les modèles de prédiction sont présentés dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Modèles de prédiction des BAP-B et BSAP-I avec la méthode MBE

Propriétés	ASTM	équation	Model pour la prédiction des propriétés de béton	R ²
Fluidité initiale	N/A	1	$r = \frac{V_{BAP}}{A_{BAP} * (D_{max})_{BAP}} = \frac{V_{MBE}}{A_{MBE} * (D_{max})_{MBE}}$	N/A
Fluidité après 60 min	N/A	2	$\text{Etalement}_{(\text{béton})} = 2 * \text{Etalement}_{(\text{MBE})}$	0,8
Demande en SP	N/A	3	$\text{SP}_{(\text{béton})} = 1,14 * \text{SP}_{(\text{MBE})}$	0,95
Début de prise	N/A	4	$\text{Début de prise}_{(\text{BAP-B})} = 0,92 * \text{Début de prise}_{(\text{MBE-B})}$	0,93
Flux maximal	N/A	5	$\text{Flux maximal}_{(\text{BAP-B})} = 1,1 * \text{Flux maximal}_{(\text{MBE-B})}$	0,98
Résistance en compression	ASTM C39 & ASTM C109	6	Pour le MBE-B en cube 40 ³ mm ³ $f_c_{(\text{BAP-B})} = 0,62 * f_c_{(\text{MBE-B})}$	0,93
Résistance en compression	ASTM C39 & ASTM C109	7	Pour le MBE-B en cube 50 ³ mm ³ $f_c_{(\text{BAP-B})} = 1,03 * f_c_{(\text{MBE-B})}$	0,97

5.2 Prédiction des propriétés des MBE à différentes températures par les résultats obtenus à 22°C

Selon la grande base de donnée qu'on a obtenu, Les propriétés des MBE (la demande en PC, la demande en PNS, la demande en AEA, le flux maximal et la résistance en compression à 1 jour à différentes températures (T°C : 8, 15, 22, 29 et 36°C) peuvent être prédites par rapport à leurs références (22°C) avec une corrélation linéaire basée sur un coefficient de corrélation $R^2 > 0,8$ et les coefficients A et B. La description de l'effet de la température sur chaque propriété de MBE est fournie dans les sections suivantes.

5.2.1 La demande en SP

La modélisation de la température sur la demande en PC (PC%) est résumé sur la base de trois séries de MBE, le MBE-B, le MBE-I et le MBE-P, chaque série de MBE contient deux types d'ajouts cimentaire respectivement. Le PC1 est utilisé dans le MBE-B et le MBE-I, mais le MBE-P incorpore l'autre type de PC (le PC2). Tous les résultats du rapport $PC \% (T^\circ) / PC\% (22^\circ C)$ de ces trois séries de MBE sont donnés dans l'annexe B. La variation de la demande en PC ($PC \% (T^\circ)$) en fonction de la température (T°C) et la demande en PC à 22°C ($PC\% (22^\circ C)$) peuvent être prédites par le modèle mathématique suivant :

$$PC\% (T^\circ C) = PC\% (22^\circ C) * (A * T^\circ C + B)$$

Tableau 5.2 : Coefficient de corrélation et constantes sur la demande en PC

Coefficient	MBE-B-PC1 (CV ou FC)	MBE-I-PC1 (CV ou LT)	MBE-P-PC2 (CV ou FS)
A	0,02	0,014	0,02
B	0,54	0,67	0,60
R^2	0,98	0,96	0,90

On remarque qu'il existe une bonne corrélation entre le PC% et la température dans trois séries de MBE avec les coefficients de corrélation qui sont supérieurs à 0,9. La demande en PC augmente avec l'augmentation de la température. Le pourcentage de PC1 libre après le malaxage est plus grand et la surface des hydrates est plus petite à faible température, le rapport PC1/SSA est augmenté à faible température qui peut conduire à une amélioration de la fluidité, donc la demande en PC1 est faible afin de garder la même fluidité. Les coefficients de corrélation et les constantes de la demande en PC sont

différents entre chaque série (Tableau 5.2). On peut prédire la demande en PC1 ou PC2 pour une fluidité fixée à différentes températures dans le cas où dosage à 22°C est connu. Cette relation linéaire est différente pour chaque série de MBE avec des coefficients A et B différents. Mais les différents types d'ajout cimentaire utilisé dans une même série de MBE ne change pas les coefficients A et B (Figure 5.11, Figure 5.12 et Figure 5.13).

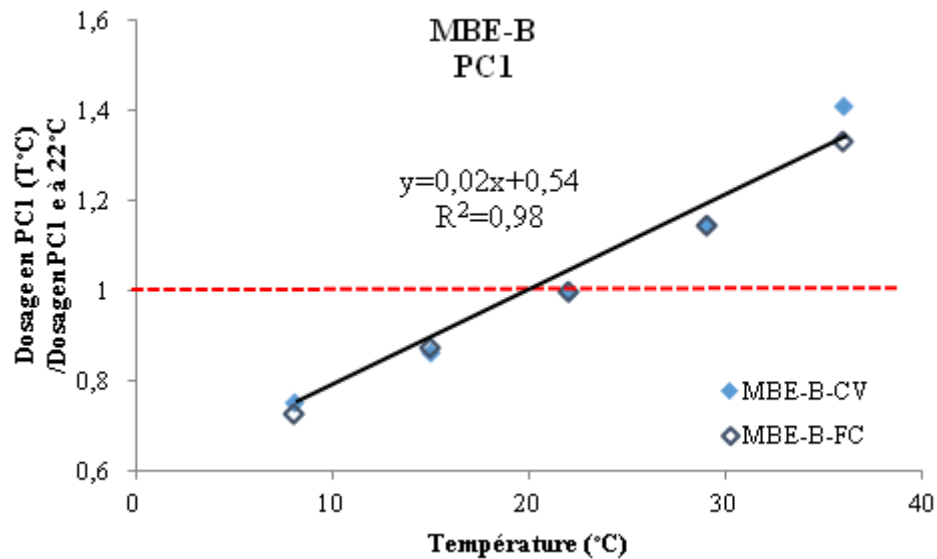


Figure 5.11 : Variation du PC% en fonction de la température pour le MBE-B-PC1

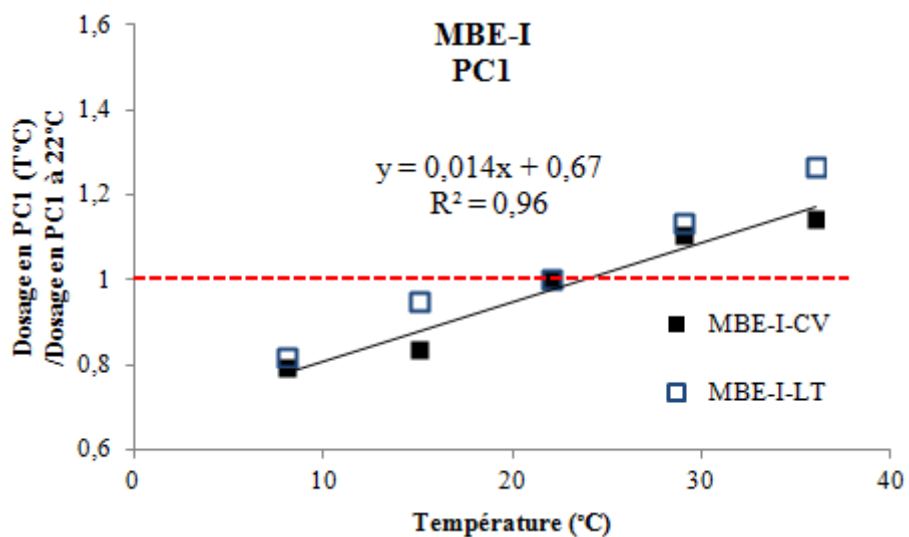


Figure 5.12: Variation du PC% en fonction de la température pour le MBE-I-PC1

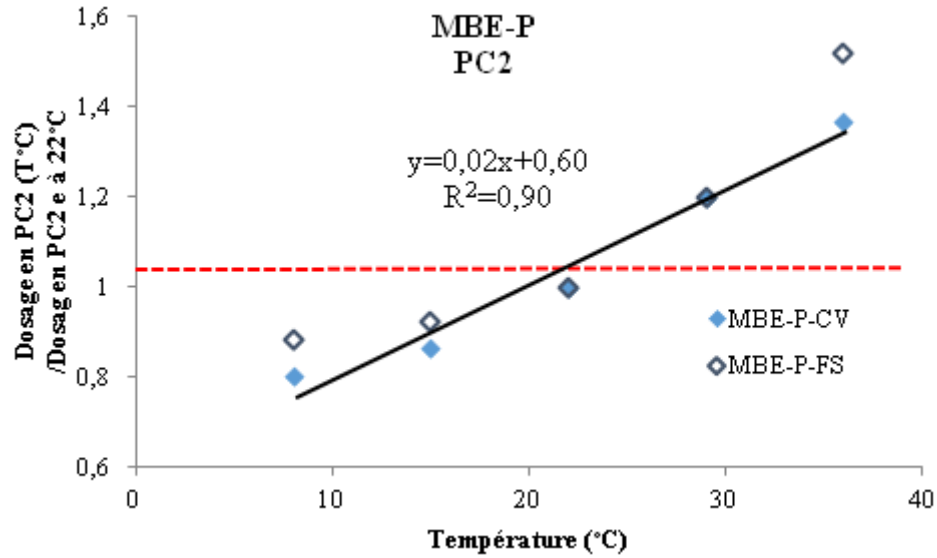


Figure 5.13 : Variation du PC% en fonction de la température pour le MBE-P-PC2

La modélisation de la température sur la demande en PNS (PNS%) se base sur deux séries de MBE, le MBE-B et le MBE-I. Chaque série de MBE contient respectivement deux types d'ajout cimentaire. Tous les résultats du rapport $\text{PNS\%}_{(T^{\circ}\text{C})} / \text{PNS\%}_{(22^{\circ}\text{C})}$ aux températures de 8, 15, 22, 29 et 36°C de ces trois séries de MBE sont donnés en annexe B. La variation de la demande en PNS à différentes températures ($\text{PNS\%}_{(T^{\circ}\text{C})}$) par rapport à celle en PNS à 22°C ($\text{PNS\%}_{(22^{\circ}\text{C})}$) est très faible, sauf pour le MBE-I à la température froide de 8°C. Le PNS agit par répulsion électrostatique qui augmente avec la température, mais en même temps la surface spécifique des hydrates augmente également avec la température, donc la fluidité ne varie pas et la demande en PNS ne change pas. Le différent type d'ajout cimentaire utilisé dans le MBE n'a pas également donné d'influence sur la variation du dosage en PNS à différentes températures (Figure 5.14 et Figure 5.15).

$$\text{PNS\%}_{(T^{\circ}\text{C})} \approx \text{PNS\%}_{(22^{\circ}\text{C})}$$

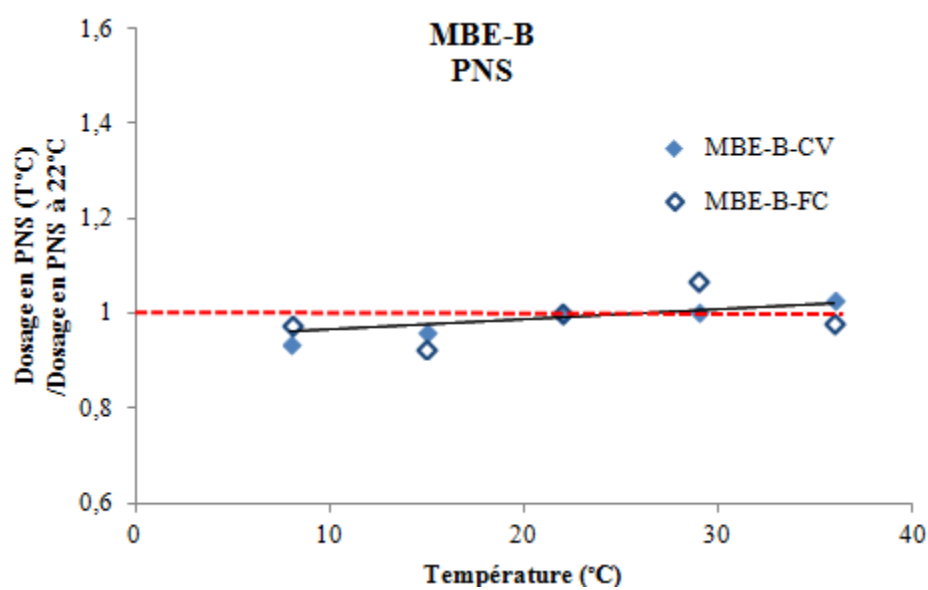


Figure 5.14: Variation du PNS% en fonction de la température pour le MBE-B-PNS

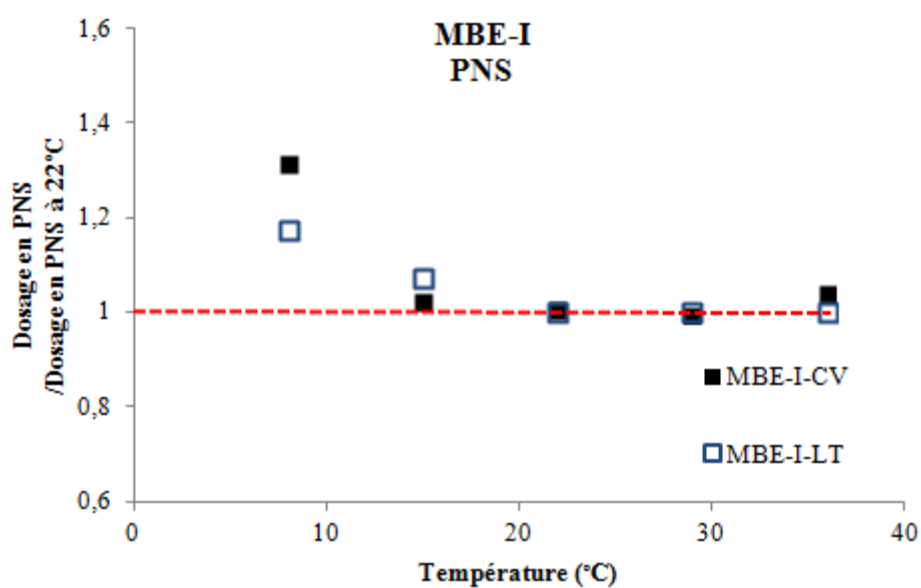


Figure 5.15: Variation du PNS% en fonction de la température pour le MBE-I-PNS

5.2.2 La demande en AEA

La modélisation de la température sur la demande en AEA (AEA%) se fera sur le MBE-I qui contient deux types de SP (PC1 ou PNS respectivement) et deux types d'ajout cimentaire (CV ou LT respectivement). Tous les résultats du rapport $AEA\%_{(T^{\circ}C)} / AEA\%_{(22^{\circ}C)}$ aux températures de 8, 15, 22, 29 et 36°C du MBE-I sont donnés dans l'annexe. La variation de la demande en AEA ($AEA\%_{(T^{\circ}C)}$) en fonction de la température ($T^{\circ}C$) et de la demande en AEA à 22°C ($AEA\%_{(22^{\circ}C)}$) peut être prédite par le modèle mathématique suivant :

$$AEA\%_{(T^{\circ}C)} = AEA\%_{(22^{\circ}C)} * (A * T^{\circ}C + B)$$

Tableau 5.3: Coefficient de corrélation et constante de la demande en AEA

Coefficient	MBE-I-PC1 (CV ou LT)	MBE-I-PNS (CV ou LT)
A	0,063	0,017
B	-0,43	0,65
R ²	0,92	0,86

On remarque qu'il existe une bonne corrélation entre l'AEA% et la température dans le MBE-I avec des coefficients de corrélation qui sont supérieurs de 0.85. La demande en AEA augmente avec l'augmentation de la température. Les coefficients de corrélation et les constantes sur la demande en AEA sont différents quand le type de SP utilisé varie (Tableau 5.3). On peut prédire la demande en AEA pour une teneur en air fixée à différentes températures connaissant le dosage en AEA à 22°C. Cette relation linéaire est différente entre l'incorporation de PC ou PNS dans le MBE-I avec des coefficients A et B qui varient. Mais le différent type d'ajout cimentaire utilisé (CV ou LT) dans le MBE-I n'a pas changé les coefficients A et B (Figure 5.16 et Figure 5.17).

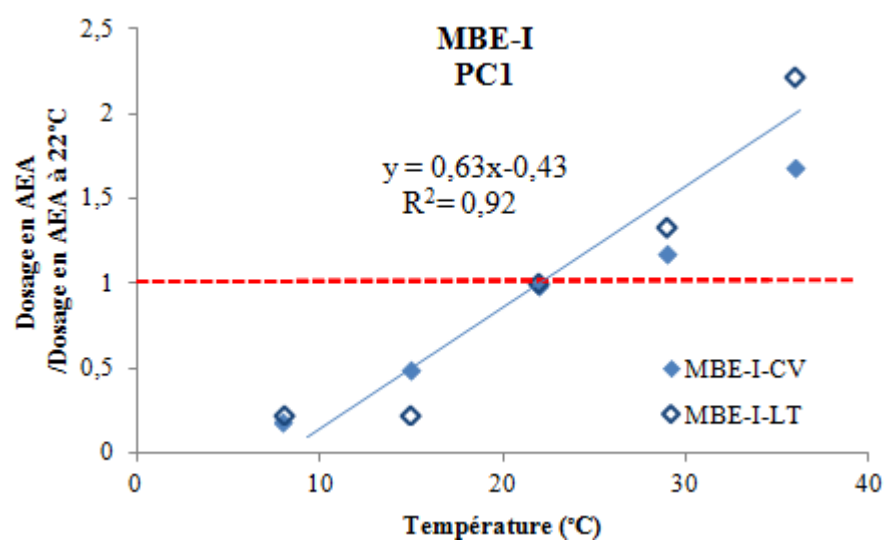


Figure 5.16: Variation d'AEA% en fonction de la température pour le MBE-I-PC1

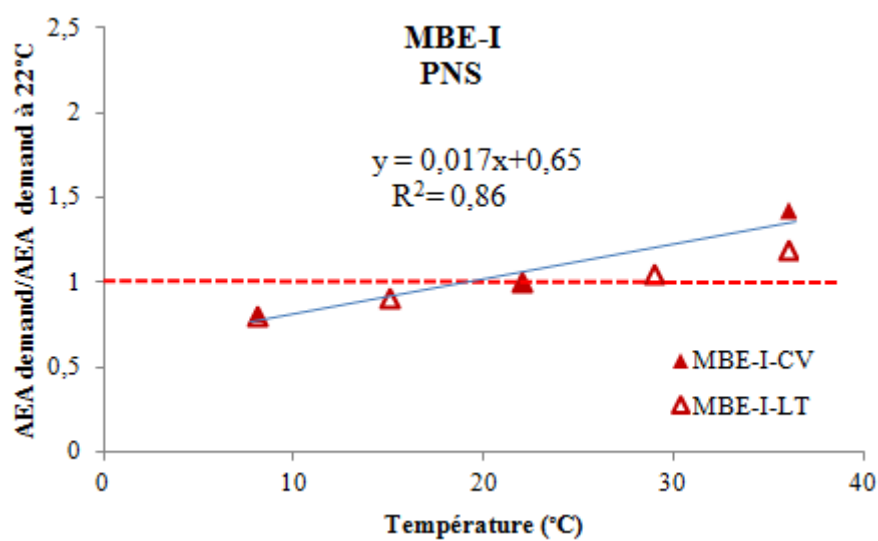


Figure 5.17: Variation d'AEA% en fonction de la température pour le MBE-I-PNS

5.2.3 Flux maximal

La modélisation de la température sur le flux maximal (F_{\max}) a été étudiée sur le MBE-B qui contient deux types de SP (PC1 ou PNS respectivement) et deux types d'ajout cimentaire (CV ou FC respectivement) mais aussi sur le MBE-P qui contient seulement le PC2 et deux types d'ajout cimentaire (CV ou FS). Tous les résultats de rapport $F_{\max (T^{\circ}\text{C})} / F_{\max (22^{\circ}\text{C})}$ aux températures de 8, 15, 22, 29 et 36°C de MBE-B et MBE-P sont donnés dans l'annexe. La variation du flux maximal ($F_{\max (T^{\circ}\text{C})}$) en fonction de la température ($T^{\circ}\text{C}$) et du flux maximal à 22°C ($F_{\max (22^{\circ}\text{C})}$) peut être prédite par le modèle mathématique suivant :

$$F_{\max (T^{\circ}\text{C})} = F_{\max (22^{\circ}\text{C})} * (A * T^{\circ}\text{C} + B)$$

Tableau 5.4: Coefficient de corrélation et constantes du flux maximal

Coefficient	MBE-B-CV (PC1 et PNS)	MBE-B-FC (PC1 et PNS)	MBE-P-CV (PC2)	MBE-P-FS (PC2)
A	0,05	0,12	0,05	0,09
B	0	-1,01	0	0,49
R ²	0,99	0,88	0,98	0,92

On remarque qu'il existe une bonne corrélation entre le flux maximal et la température pour le MBE-B et le MBE-P avec les coefficients de corrélation qui sont supérieurs à 0,88. Le flux maximal augmente avec l'augmentation de la température. Le type de SP ne change pas les coefficients de corrélation et les constantes du flux maximal, mais ces derniers varient selon le changement du type d'ajout cimentaire incorporé (Tableau 5.4, Figure 5.18, Figure 5.19 et Figure 5.20).

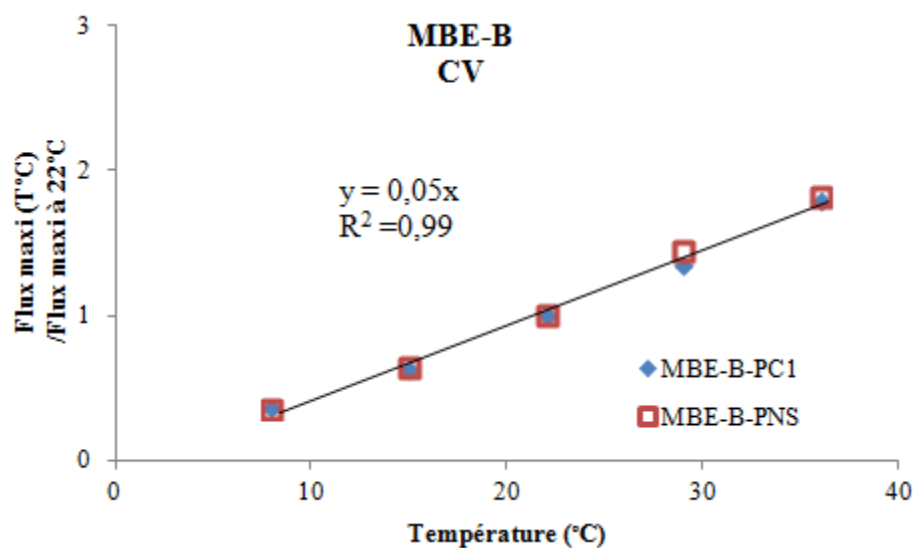


Figure 5.18: Variation du flux maximal en fonction de la température pour le MBE-B-CV

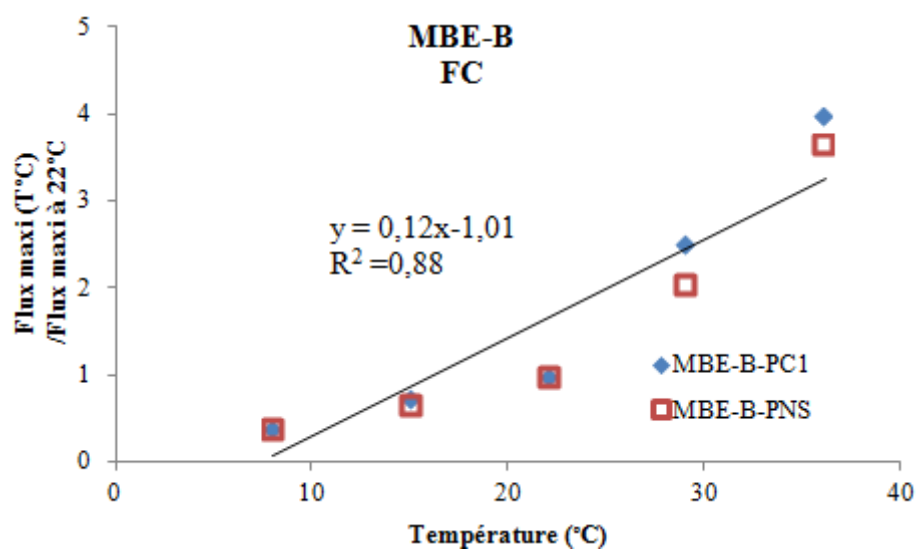


Figure 5.19: Variation du flux maximal en fonction de la température pour le MBE-B-FC

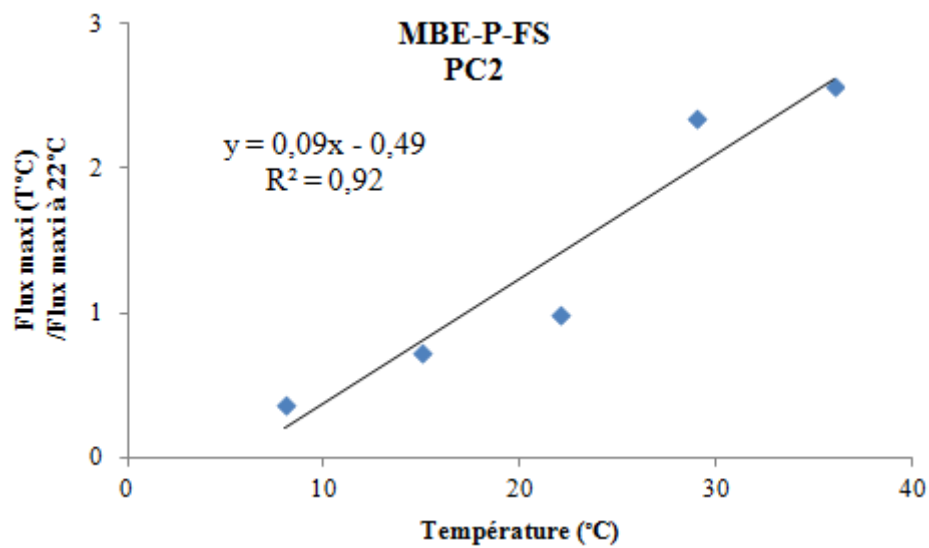
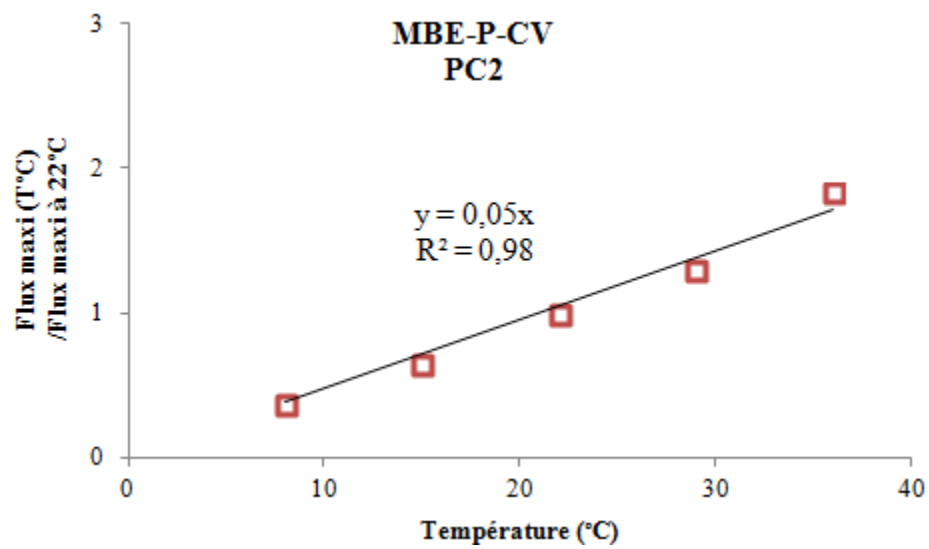


Figure 5.20: Variation du flux maximal en fonction de la température pour le MBE-P-PC2 pour deux types d'ajout

5.2.4 Résistance en compression à 1 jour

La modélisation de la température sur la résistance en compression à 1 jour (f_c) a été effectuée sur toutes les série de MBE : le MBE-B qui contient deux types de SP (PC1 ou PNS respectivement) et deux types d'ajout cimentaire (CV ou FC respectivement), le MBE-P qui contient seulement le PC2 mais deux types d'ajout cimentaire (CV ou FS respectivement) et le MBE-I qui a contenu deux types de SP (PC1 ou PNS respectivement) et deux types d'ajout cimentaire (CV ou LT respectivement) . Tous les résultats du rapport $f_c (T^{\circ}\text{C}) / f_c (22^{\circ}\text{C})$ aux températures de 8, 15, 22, 29 et 36°C de MBE sont donnés dans l'annexe. La variation de la résistance en compression à 1 jour ($f_c (T^{\circ}\text{C})$) en fonction de la température ($T^{\circ}\text{C}$) et de la résistance en compression à 1 jour à 22°C ($f_c (22^{\circ}\text{C})$) peut être prédite par le modèle mathématique suivant :

$$f_c (T^{\circ}\text{C}) = f_c (22^{\circ}\text{C}) * (A * T^{\circ}\text{C} + B)$$

Tableau 5.5: Coefficient de corrélation et constantes sur la résistance en compression à 1 jour

Coefficient	MBE
A	0,05
B	-0,26
R^2	0,92

On remarque qu'il existe une bonne corrélation entre la résistance en compression à 1 jour et la température dans tous les MBE étudiés (le MBE-B, le MBE-P et le MBE-I) avec les coefficients de corrélation qui sont supérieurs à 0,92. Le f_c à 1 jour augmente avec l'augmentation de la température (Figure 5.21).

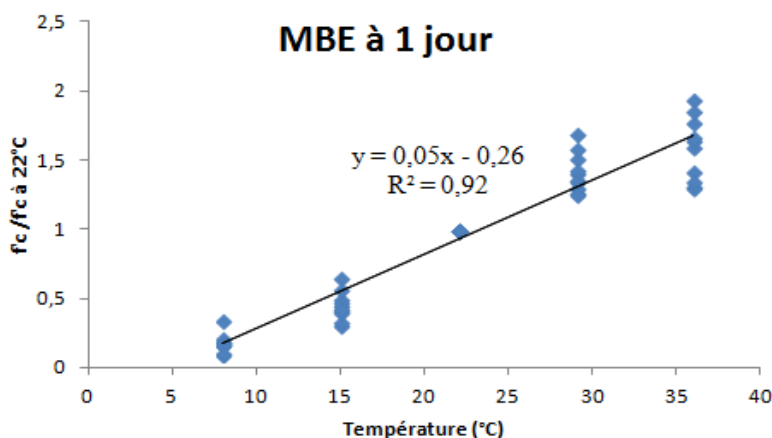


Figure 5.21: Variation du f_c à 1 jour en fonction de la température pour tous les MBE étudiés.

5.2.5 Conclusion :

Il existe une bonne corrélation entre les propriétés des MBE étudiés à différentes températures et celles à 22°C (la demande en SP, la demande en AEA, le flux maximal et la résistance en compression à 1 jour) avec des coefficients de corrélation élevés. Ces corrélations sont linéaires et augmentent avec la température.

Les propriétés de MBE étudiées à différentes températures peuvent être estimées par leur valeur de référence (valeur à 22°C) en utilisant le modèle mathématique suivant :

$$Y_{(T^{\circ}C)} = Y_{(22^{\circ}C)} * (A * T^{\circ}C + B)$$

Y : La demande en SP, la demande en AEA, le flux maximal par gramme de ciment et la résistance en compression à 1 jour

T°C : Température (soit pour notre étude : 8, 15, 22, 29 et 36°C)

A, B : Coefficients

5.3 Synthèse

Les résultats montrent que le MBE correspondant peut prédire la fluidité, la demande en SP ou AEA, la teneur en air, le seuil de cisaillement, la prise initiale, le flux maximal et la résistance en compression de BAP-B et BSAP-I par les équations mathématiques. D'ailleurs, les propriétés des MBE à différentes températures comme la demande en SP, la demande en AEA, le flux maximal et la résistance en compression à 1 jour peuvent être estimés par leur valeur à 22°C avec l'équation mathématique. En raison des critères de performance élevés, la formulation d'un béton fluide à rhéologie adaptée comme le BAP et le BSAP-I peut nécessiter l'utilisation de plusieurs adjuvants chimiques et ajout cimentaires qui provoquent de nombreuses variations. Les équations mathématiques données permettent de prévoir les caractéristiques des bétons et faciliter la détermination de la formulation et la limite d'utilisation de ces bétons.

Conclusion Générale

Les travaux réalisés et présentés dans cette thèse portent sur l'étude de l'effet de la température et de l'agitation sur les performances des bétons à rhéologie adaptée et leurs mortiers de béton équivalent (MBE). Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un vaste programme de recherche initié par l'Université de Sherbrooke regroupant des partenaires de l'industrie du béton canadien et ayant pour but de promouvoir l'utilisation de béton fluide à rhéologie adaptée. Cette étude porte sur différents types de béton, un béton autoplçant destiné aux travaux de bâtiment et un destiné à la préfabrication, sans agent entraîneur d'air (AEA), et un béton semi-autoplçant destiné aux travaux d'infrastructures avec AEA. Les propriétés rhéologiques, calorimétriques et mécaniques de ces bétons ont été étudiées en faisant varier la température entre 8 et 36°C ainsi qu'en utilisant des vitesses d'agitation différentes.

L'intérêt de ces travaux s'inscrit également dans la vérification de la méthode MBE sur les BAP en fonction de la température et de l'agitation et la prédiction des propriétés rhéologiques et mécaniques des MBE à différentes températures et dans le temps. L'idée est de proposer des précautions à prendre pour faciliter les formulations des BAP à différentes températures et agitations auxquels ils peuvent être soumis en pratique. Les études réalisées au cours de cette thèse sont structurées en trois parties.

L'objectif de la première partie était d'étudier l'effet de la température sur l'efficacité des adjuvants est, d'essayer d'expliquer cet effet sur les propriétés rhéologiques, calorimétriques et mécaniques des MBE et des BAP.

La fluidité initiale fixée des MBE et des BAP est contrôlée en faisant varier la demande en superplastifiant (SP) quelle que soit la température. Cette variation de la demande en SP est différente suivant le type de SP utilisé. La demande en polynaphtalène sulfonate (PNS) est plus grande que la demande en polycarboxylate (PC1) afin d'avoir une fluidité initiale identique. En revanche, la variation de la demande en PC1 en fonction de la température est plus grande que celle en PNS. Ceci peut être expliqué par le rapport du dosage en PC1 libre (PC1%) / surface spécifique des hydrates (SSA) à différentes températures. Nous avons vu que le PC1% diminuait et que la SSA augmentait avec la température. Le rapport PC1% / SSA diminue donc avec la température, ce qui engendre

une perte de la fluidité. Par conséquent, la demande en PC1 afin de garder la même fluidité augmente avec la température. En revanche, l'effet de la température sur l'activité des molécules de PNS et la SSA est contraire et n'a donc pas d'influence sur la fluidité et la demande en PNS.

La teneur en air des MBE et des BAP sans AEA augmente quand la température est faible ($< 15^{\circ}\text{C}$). De ce fait, la demande en AEA des MBE et des BAP est plus faible à basse température. Quand une teneur en air est désirée par l'incorporation d'AEA, la variation de la demande en AEA est linéaire avec la température. La teneur en air des MBE à $5 \pm 0,5 \%$ correspond celle des BAP à $8 \pm 1 \%$. Afin d'avoir ces teneurs en air, la demande en AEA combiné avec le PNS est plus grande que celle combiné avec le PC1. L'AEA avec le PC1 est plus efficace.

L'augmentation de la température augmente également le flux maximal et la résistance en compression à court terme, mais entraîne une diminution de la fluidité et du temps de début de prise. Pour les MBE et les BAP avec le PC1, même si la demande en PC1 augmente avec la température, la partie de PC1 supplémentaire ne permet pas de neutraliser l'effet de la température sur ces propriétés. La durabilité des BAP a été testée seulement sur les BSAP-I à différentes températures, et il a été trouvé que la détérioration apparaissait constamment à basse température (8°C).

L'objectif de la deuxième partie était d'étudier l'effet de l'agitation (temps et vitesse) à 22°C et l'effet couplé de l'agitation et de la température sur la fluidité, la teneur en air, les propriétés rhéologiques et mécaniques des MBE et des BAP.

Le temps d'agitation change la fluidité et le seuil de cisaillement des MBE et des BAP. Le PC1 libre après 40 minutes du contact eau-ciment est plus important à basse température que celui à température élevée. Mais après 40 minutes, il n'y a plus de PNS libre dans le MBE. Cette différence peut expliquer également pourquoi la fluidité diminue et le seuil de cisaillement des mélanges avec le PNS augmente plus rapidement dans le temps par rapport à ceux avec le PC1. Le temps d'agitation influence également la teneur en air et donc, la résistance en compression des BAP. Avant le coulage, le temps de transport ou le retard de coulage d'un BAP peut causer la perte de la teneur en air et donc diminuer sa durabilité. La vérification de la teneur en air avant coulage est donc nécessaire.

L'effet de la vitesse d'agitation apparait seulement dans les MBE contenant une grande quantité de SP, et provoque un effet inverse sur la fluidité et le seuil de cisaillement des MBE pour ceux contenant du PC1 ou du PNS. La vitesse d'agitation élevée conduit à une augmentation de la fluidité et à une diminution du seuil de cisaillement des MBE avec le PC1 pendant les premiers temps, l'effet inverse étant constaté quand on utilise le PNS. Ces différences sur les propriétés rhéologiques peuvent être expliquées par le mode d'action à court terme du PNS et à plus long terme du PC1. Cependant, la teneur en air, la résistance en compression et la durabilité ne change pas avec l'effet de la vitesse d'agitation.

L'effet couplé de l'agitation et de la température influence la fluidité et le seuil de cisaillement des MBE et des BAP. Durant le temps d'agitation, les variations des propriétés rhéologiques augmentent, mais cette augmentation est désordonnée avec la température. La variation de la fluidité et du seuil de cisaillement peut être influencée par la température, le temps et la variation du dosage en SP. L'augmentation de la vitesse d'agitation conduit respectivement à une diminution ou une augmentation de la fluidité et du seuil de cisaillement pour les MBE avec le PC1 ou ceux avec le PNS. En faisant varier la température, la tendance de cette variation est identique, mais une température élevée provoque une variation plus grande. À différentes températures, la vitesse d'agitation n'influence pas la teneur en air et la résistance.

L'objectif de la troisième partie était de valider la méthode MBE sur le BAP à différentes températures et d'élaborer des modèles de prédiction des propriétés des MBE en fonction de la température et par rapport à leurs propriétés à 22°C.

Il y a une bonne corrélation linéaire entre les MBE et les BAP à différentes températures sur la fluidité, la demande en SP, la demande en AEA, le flux maximal et la résistance en compression à 1 jour.

Un modèle mathématique peut être utilisé afin de prédire la demande en SP, la demande en AEA, le flux maximal et la résistance en compression à 1 jour des MBE à différentes températures par rapport à leurs propriétés à 22°C.

Les recommandations sont proposées ci-après sur l'utilisation de BFRA à différentes températures, agitations, types de SP et types d'ajouts cimentaires :

- La bonne robustesse des BAP et BSAP contenant des PNS sur la fluidité en fonction de la T°C.
- La demande en PC est plus faible quelle que soit la T°C par rapport à PNS ainsi que la demande en AEA qui est très faible pour assurer un contrôle fiable du réseau des bulles d'air. Le BSAP-I avec PC1 à 8°C demande très peu d'AEA - risque de détérioration au gel/dégel.
- L'agent anti-moussant est utile pour le BAP-B à 8°C pour diminuer le bullage en surface.
- La résistance en compression des BAP et des BSAP à 1 jour est inférieure à 3,5 MPa à 8°C (retarde le décoffrage).
- La mise en place des BAP (PC) à vitesse d'agitation élevée ne doit pas être effectuée trop rapidement (risque de ségrégation).
- 3% d'air supplémentaire est initialement demandé pour le BSAP-I s'il subit une heure d'agitation.
- Les couples PC1/CV et le PNS/FC sont proposés pour le BAP-B.
- Le PC1 et le FC améliorent la rétention de maniabilité.
- La CV augmente le besoin en agent entraîneur d'air.

Cette étude a permis de montrer que la température et l'agitation du mélange cimentaire sont des paramètres externes qui influencent fortement les propriétés rhéologiques, calorimétriques et mécaniques du BAP et du MBE. Ces résultats nous aident à prévoir les conséquences des changements de condition climatique (température) et du transport (temps et vitesse d'agitation), puis à donner des recommandations afin de répondre à la demande des BAP pour un bon rapport performance-coût. En effet, la condition climatique est liée à l'humidité relative, la vitesse du vent et l'échange de la chaleur quand la température du BAP est différente de la température ambiante. Il sera donc nécessaire d'étudier les effets de ces conditions externes sur le BAP.

En outre, l'effet de l'agitation dans le temps sur l'efficacité des SP, le dosage en SP libre dans la solution et la fluidité dans le temps, n'a été réalisé qu'à 40 minutes après le

contact eau-ciment dans le MBE. Les molécules PNS sont presque toutes consommées, la variation du PNS libre selon la température n'est pas claire.

Ces résultats ouvrent d'autres perspectives à explorer : la variation de la fluidité et des propriétés rhéologiques influencée par l'effet de l'agitation dans le temps et le point d'équilibre entre l'effet du dosage en SP et la température peut encore être approfondie. Enfin, l'étude de la limite de la méthode MBE pour le BAP serait intéressante en faisant varier le rapport eau/ciment, la quantité de liant, les granulométries de granulats, etc.

Références bibliographiques

- ACI Committee. (1993), "Guide for selecting proportions for high-strength concrete with Portland cement and fly ash", *ACI Mater J90*, pp. 272–283.
- Adjoudj, M. and Ezziane, K. (2010), "Perte d'efficacité d'un superplastifiant en présence d'un ciment composé et sous une température élevée", *International sur la Construction en Zone Sismique*.
- Ahmad, I. and Azhar, S. (2004), "Temperature variation in high slump drilled shaft concrete and its effect on slump loss", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 No. 2, pp. 207–217.
- Aiad, I. (2003), "Influence of time addition of superplasticizers on the rheological properties of fresh cement pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33 No. 8, pp. 1229–1234.
- Aitcin, P.-, Jiang, S., Kim, B.-, Nkinamubanzi, P.- and Petrov, N. (2001), "Cement/superplasticizer interaction: the case of polysulfonates", *BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, pp. 87–98.
- Arrhenius, S. (1889), "On the reaction velocity of the inversion of cane sugar by acids", *Zeitschrift für Physikalische Chemie*.
- Artelt, C. and Garcia, E. (2008), "Impact of superplasticizer concentration and of ultra-fine particles on the rheological behaviour of dense mortar suspensions", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38 No. 5, pp. 633–642.
- Assaad, J. and Khayat, K.H. (2005), "Kinetics of formwork pressure drop of self-consolidating concrete containing various types and contents of binder", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 No. 8, pp. 1522–1530.
- Assaad, J., Khayat, K.H. and Mesbah, H. (2003), "Assessment of Thixotropy of Flowable and Self-Consolidating Concrete", *Materials Journal*, Vol. 100 No. 2, pp. 99–107.
- Assaad, J.J., Harb, J. and Chakar, E. (2009), "Relationships Between Key ASTM Test Methods Determined on Concrete and Concrete-Equivalent-Mortar Mixtures", *Journal of ASTM international*, Vol. 6 No. 3, p. 13.
- Baltrus, J.P. and LaCount, R.B. (2001), "Measurement of adsorption of air-entraining admixture on fly ash in concrete and cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31 No. 5, pp. 819–824.
- Banfill, P.F.G. (2006), "RHEOLOGY OF FRESH CEMENT AND CONCRETE", *Rheology Reviews*, pp. 61–130.
- Banfill, P.F.G. and Tattersall, G.H. (1983), *The rheology of fresh concrete*.

- Barbarulo, R. (2002), *COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX CIMENTAIRES : actions des sulfates et la température*.
- Barfield, M. and Ghafoori, N. (2012), “Air-entrained self-consolidating concrete: A study of admixture sources”, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, Vol. 26 No. 1, pp. 490–496.
- Beaulieu, J. (n.d.). *Utilisation des ajouts cimentaires au Québec*.
- Beaupré, D. (1994), *Rheology of high performance shotcrete*.
- Burgos-Montes, O., Palacios, M., Rivilla, P. and Puertas, F. (2012), “Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions”, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, Vol. 31, pp. 300–309.
- Byfors, J. (1980), *Plain concrete at early ages*, (Institute, S.C. and C.R., Ed.).
- Cazacliu, B. and Dauvergne, Michel. (2002), *malaxage de béton autoplaçant. Influence du temps de malaxage et du type de malaxeur*.
- Centre de Recherches Routières. (2002), *code de bonne pratique pour l'utilisation des entraîneurs d'air dans les bétons routiers: application, formulation et contrôle*.
- Choi, S., Cha, S.W., Oh, B.H. and Kim, I.H. (2011), “Thermo-hygro-mechanical behavior of early-age concrete deck in composite bridge under environmental loadings. Part 1: temperature and relative humidity”, *Materials and Structures*, Vol. 44 No. 7, pp. 1325–1346.
- Chopin, D. (2003), *Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants : optimisation du temps de fabrication*.
- Chopin, D., de Larrard, F. and Cazacliu, B. (2004), “Why do HPC and SCC require a longer mixing time?”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 No. 12, pp. 2237–2243.
- Claude Bedard, P.E. and Mailvaganam, N.P. (2006), “The Use of Chemical Admixtures in Concrete. Part II: Admixture-Admixture Compatibility and Practical Problems”, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 20, pp. 2–5.
- ConTec Ltd. (n.d.). *Congratulation with your new ConTec viscometer, the state of the art within the viscometry of cement based materials*.
- Daimon, M. (1980), “Mécanisme et cinétique de l'hydratation du ciment au laitier”, *7e congrès international de la chimie des ciment*, Paris.
- Dehn, F. (n.d.). “INFLUENCE OF MIXING TECHNOLOGY ON FRESH CONCRETE PROPERTIES OF HPFRCC”, pp. 1–8.
- Du, L. and Folliard, K.J. (2005), “Mechanisms of air entrainment in concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 No. 8, pp. 1463–1471.

- Duval, R. and Kadri, E.. (1998), “Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 28 No. 4, pp. 533–547.
- El-Didamonya, H., Heikalb, M., Khalila, K.A. and Al-Masrya, S. (2012), “EFFECT OF DELAYING ADDITION TIME OF SMF SUPERPLASTICIZER ON HYDRATION CHARACTERISTICS OF BLENDED CEMENT PASTES”, *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pp. 261–269.
- Erdem, K., Khayat, K.H. and Yahia, A. (2010), “Correlating Rheology of Self-Consolidating Concrete to Corresponding Concrete-Equivalent Mortar”, No. 106.
- Erdoğan, Ş. (2005), “Effect of retempering with superplasticizer admixtures on slump loss and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 No. 5, pp. 907–912.
- Feddal, D. (2006), “Réalisation d ’ un calorimètre isotherme plan : Comparaison de l ’ énergie d ’ activation apparente obtenue sur béton , mortier de béton équivalent et mortier CEN”, *Xxivemes Rencontres Universitaires De Genie Civil 2006 – Prix Jeunes Chercheurs*, p. 8.
- Felekoğlu, B. and Sarikahya, H. (2008), “Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 22 No. 9, pp. 1972–1980.
- Felekoglu, B., Turkel, S. and bulent, beradan. (2007), “Effect of water / cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete”, Vol. 42, pp. 1795–1802.
- Fernández-Altable, Víctor Casanova, I. and Gnasi. (2006), “Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36 No. 7, pp. 1222–1230.
- Ferraris, C.F. (2001), “Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art”, *National Institute of Standards and Technology*, Vol. 106 No. 2, pp. 391–399.
- Flatt, R. J. and Houst, Y. F. (2001), “A simplified view on chemical effects perturbing the action of superplasticizers”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31 No. 8, pp. 1169–1176.
- Freeman, E., Gao, Y.-M., Hurt, R. and Suuberg, E. (1997), “Interactions of carbon-containing fly ash with commercial air-entraining admixtures for concrete”, *Fuel*, Vol. 76 No. 8, pp. 761–765.
- Gajda, J., Webe, M. and Diaz-Loya, I. (2014), “A Low Temperature Rise Mixture for Mass Concrete than portland cement”, *Concrete international*, No. Table 2, pp. 48–53.
- Gallucci, E., Zhang, X.Y. and Scrivener, K. (2006), *INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LE DEVELOPPEMENT MICROSTRUCTURAL DES BETONS*.

- Garcia, B.S. (1999), *Retrait au jeune âge du béton : Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène*.
- Gaynor, R.D., MEININGER, R.C. and Khan, T.S. (1985), "EFFECT OF TEMPERATURE AND DELIVERY TIME ON CONCRETE PROPORTIONS", *National Ready Mixed Concrete Association*, pp. 68–87.
- Gebler, Steven H. and Klieger, P. (1986), *Effect of fly ash on some of the physical properties of concrete*.
- Ghafoori, N. and Diawara, H. (2010), "Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete", *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, Vol. 24 No. 6, pp. 946–955.
- Girish, S., Ranganath, R.V. and Vengala, J. (2010), "Influence of powder and paste on flow properties of SCC", *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, Vol. 24 No. 12, pp. 2481–2488.
- Gołaszewski, J. and Szwabowski, J. (2004), "Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 No. 2, pp. 235–248.
- Goto, S. and Roy, D.M. (1981), "The effect of w/c ratio and curing temperature on the permeability of hardened cement paste", *Cement and Concrete Research*, Vol. 11 No. 4, pp. 575–579.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaoğlu, S. and Mermerdaş, K. (2012), "Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes", *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 120–130.
- Hanehara, S. and Yamada, K. (1999), "Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29 No. 8, pp. 1159–1165.
- Hanehara, S. and Yamada, K. (2008), "Rheology and early age properties of cement systems", *Cement and Concrete Research*, Vol. 38 No. 2, pp. 175–195.
- Helnan-Moussa, B. (2009), *Influence de la température sur la thixotropie des bétons autoplaçants*.
- Hill, R.L., Sarkar, S.L., Rathbone, R.F. and Hower, J.C. (1997), "An examination of fly ash carbon and its interactions with air entraining agent", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27 No. 2, pp. 193–204.
- Hsu, K.-C., Chiu, J.-J., Chen, S.-D. and Tseng, Y.-C. (1999), "Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21 No. 5, pp. 425–430.

- Hu, C., Larrard, F. De, Sedran, T., Boulay, C., Bosd, F., Mat, C.-L.N., Europe, D., et al. (1996), "Validation of BTRHEOM, the new rheometer for soft-to-fluid concrete", *Materials and Structures/Matériaux et Construction*, Vol. 29, pp. 620–631.
- Jiang, S. P., Mutin, J. C. and Nonat, A. (1995), "Studies on mechanism and physico-chemical parameters at the origin of the cement setting. I. The fundamental processes involved during the cement setting", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25 No. 4, pp. 779–789.
- Jolicoeur, C., Sharman, J., Otis, N., Lebel, A., Simard, M.-A. and Page, M. (1997), "The Influence of Temperature on the Rheological Properties of Superplasticized Cement Pastes", *International Concrete Research & Information Portal*, Vol. 173, pp. 379–406.
- Kada-Benameur, H., Duthoit, B. and Lejeune, G. (1997), "Dispositif d'étude de la cinétique d'hydratation des bétons par calorimétrie isotherme", *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, Vol. 210, pp. 31–40.
- Kada-Benameur, H., Wirquin, E. and Duthoit, B. (2000), "Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30 No. 2, pp. 301–305.
- Khayat, K.H. (1998), "Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials — An overview", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 20 No. 2, pp. 171–188.
- Kim, B., Jiang, S., Jolicoeur, C. and Aitcin, P.-C. (2000), "The adsorption behavior of PNS superplasticizer and its relation to fluidity of cement paste", Vol. 30, pp. 887–893.
- Kim, J., Hun, S. and Chul, Y. (2002), "Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete Part I. Experimental results", Vol. 32, pp. 1087–1094.
- Kim, J.H., Beacraft, M. and Shah, S.P. (2010), "Effect of mineral admixtures on formwork pressure of self-consolidating concrete", *Cement and Concrete Composites*, Elsevier Ltd, Vol. 32 No. 9, pp. 665–671.
- Kirca, O., Turanlı, L. and Erdog, T.Y. (2002), "Effects of retempering on consistency and compressive strength of concrete subjected to prolonged mixing", Vol. 32, pp. 441–445.
- Kjellsen, K.O. and Detwiler, R.J. (1992), "Reaction kinetics of portland cement mortars hydrated at different temperatures", *Cement and Concrete Research*, Vol. 22 No. 1, pp. 112–120.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W.C., MacLeod, N.F. and McGrath, R.J. (2004), *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, Montréal, Associati.
- Kouakou, A., Legrand, C. and Wirquin, E. (1996), "Mesure de l'énergie d'activation apparente des ciments dans les mortiers à l'aide du calorimètre semi-adiabatique de Langavant", *Matériaux et Construction*, Vol. 29, pp. 444–447.

- Kwelle, S.O. and Mofunlewi, S.S. (2008), “The Effect of Mixing Energy and Shear Rate on the Thickening Time of Cement Slurry”, *Leonardo Journal of Sciences*, No. 13, pp. 78–89.
- Lafarge. (2014), “Par temps chaud/froid, faut-il prendre des précautions pour la mise en œuvre de bétons et mortiers?”, available at: http://www.lafarge-france.fr/wps/portal/fr/2_8-FAQ.
- Łaźniewska-Piekarczyk, B. (2013), “Examining the possibility to estimate the influence of admixtures on pore structure of self-compacting concrete using the air void analyzer”, *Construction and Building Materials*, Vol. 41, pp. 374–387.
- Leemann, A., Lura, P. and Loser, R. (2011), “Shrinkage and creep of SCC – The influence of paste volume and binder composition”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 No. 5, pp. 2283–2289.
- Lerch, W. (1960), *Basic principles of air entrained concrete*, Portland Cement Association.
- Li, Z., Ohkubo, T. and Tanigawa, Y. (2004), “Yield model of high fluidity concrete in fresh state”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16 No. 3, pp. 195–201.
- Lin, F. and Meyer, C. (2009), “Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure”, *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, Vol. 39 No. 4, pp. 255–265.
- Lothenbach, B., Winnefeld, F., Alder, C., Wieland, E. and Lunk, P. (2007), “Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37 No. 4, pp. 483–491.
- Martini, S. Al, Ph, D. and Nehdi, M. (2009), “Coupled Effects of Time and High Temperature on Rheological Properties of Cement Pastes Incorporating Various Superplasticizers”, No. May 2012, pp. 392–401.
- Mauricio ruiz, J., Schindler A.K., Rasmussen, R.O., Nelson, P.K. and Chang, G.K. (2001), “CONCRETE TEMPERATURE MODELING AND STRENGTH PREDICTION USING”, *7th international conference on concrete pavements*, orlando.
- Menzel, C.A. (1954), “Causes and prevention of crack development in plastic concrete”, *proceedings of the portland cement association*, pp. 130–136.
- Myers D. (1999), *Surfaces, Interfaces, and Colloids: Principles and Applications*, New York.
- Nath, P. and Sarker, P. (2011), “Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete”, *Procedia Engineering*, Elsevier B.V., Vol. 14, pp. 1149–1156.
- Nawa, T., Ichiboji, H. and Kinoshita, M. (2000), “Influence of Temperature on Fluidity of Cement Paste Containing Superplasticizer with Polyethylene Oxide Graft Chains”, *International Concrete Research & Information Portal*, Vol. 195, pp. 181–194.

- Nehdi, M. and Martini, S. Al. (2007), "Effect of Temperature on Oscillatory Shear Behavior of Portland Cement Paste Incorporating Chemical Admixtures", No. May 2012, pp. 1090–1100.
- Nehdi, M. and Al Martini, S. (2009), "Estimating time and temperature dependent yield stress of cement paste using oscillatory rheology and genetic algorithms", *Cement and Concrete Research*, Elsevier B.V., Vol. 39 No. 11, pp. 1007–1016.
- Neville, A.M. (2000), *Propriétés des Bétons*.
- Nonat, A., Mutin, J. C., Lecoq, X. and Jiang, S. P. (1997), "Physico-chemical parameters determining hydration and particle interactions during the setting of silicate cements", *Solid State Ionics*, pp. 923–930.
- Orban, J.A., Parcevaux, P.A. and Guillot, D.J. (1986), *Specific mixing energy: a key factor for cement slurry quality, 61st annual Technical Conference and Exhibition of the SPE*.
- Ortiz, J., Aguado, a., Agulló, L. and García, T. (2005), "Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 No. 10, pp. 1970–1979.
- Ouchi, M., Aki, S., Osterberg, T., Hallberg, S.-E. and Lwin, M. (2003), "Applications of Self-Compacting Concrete in Japan, Europe and the United States", *Federal Highway Administration*, pp. 1–20.
- Ovarlez, G. and Coussot, P. (2007), "Physical age of soft-jammed systems.", *Physical review.*, available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17677440>.
- Ozawa, K., Maekawa, K. and Okamura, H. (1990), "High performance concrete with high filling ability", *Proceedings of the RILEM Symposium, Admixtures for Concrete*.
- Pan, J. (2010), *influence des adjuvants chimiques sur la performance des mortiers de béton équivalant à rhéologie adaptée*.
- Pathak, N. and Siddique, R. (2012), "Effects of elevated temperatures on properties of self-compacting-concrete containing fly ash and spent foundry sand", *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 512–521.
- PCA. (2000), "Survey of Mineral Admixtures and Blended Cements in Ready Ready Mixed Concrete", *Portland cement association*, No. October, p. 16.
- PERCHE, F. (2004), *Adsorption de polycarboxylates et de lignosulfonates sur poudre modèle et ciments*, Rouen.
- Petit, J.-Y. (2005), *EFFET DE LA TEMPERATURE, DES SUPERPLASTIFIANTS ET DES AJOUTS SUR LES VARIATIONS RHEOLOGIQUES DES MICROMORTIERS ET BETONS AUTO-COMPACTANTS*.

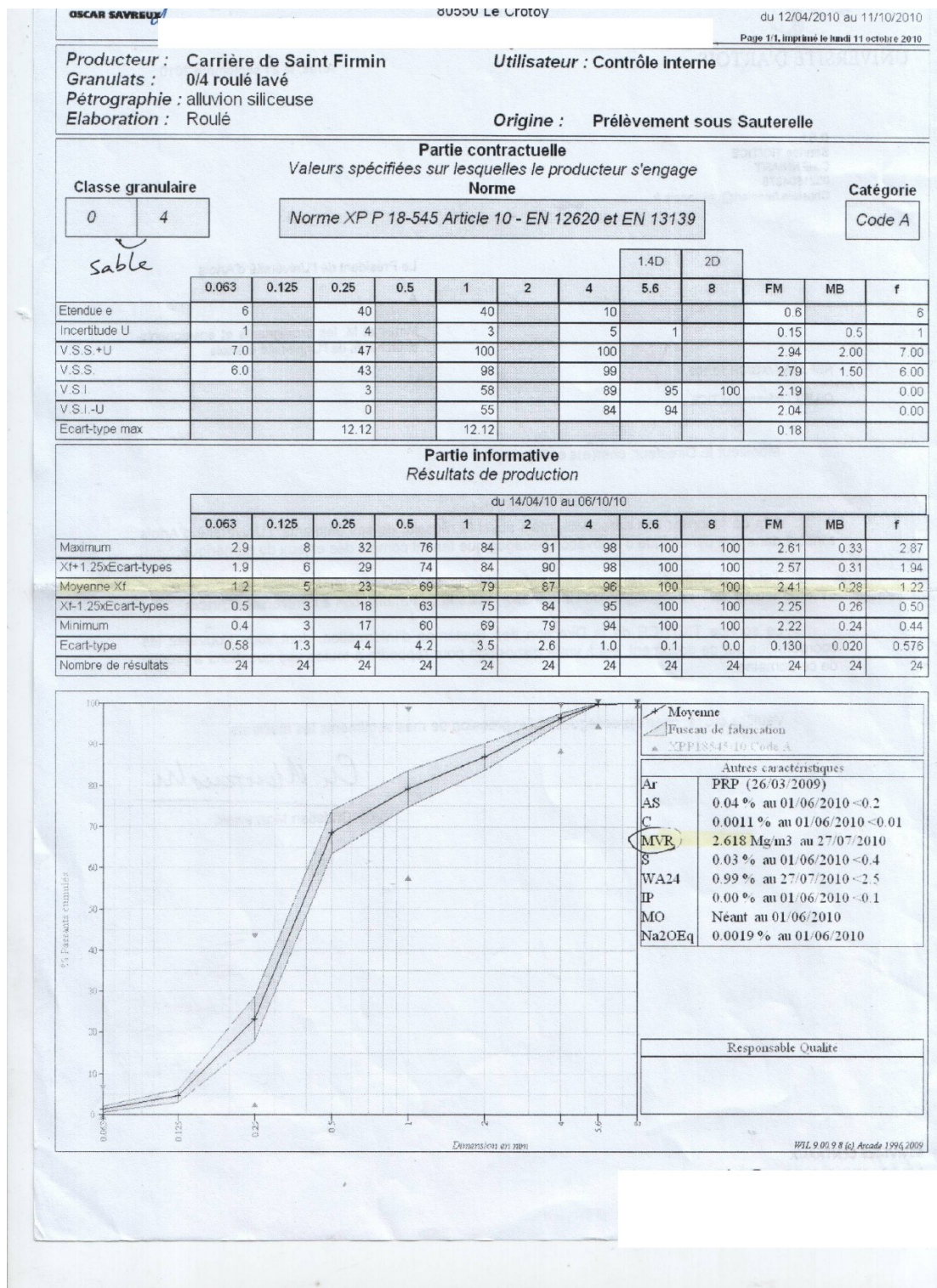
- Petit, J.-Y., Wirquin, E., Vanhove, Y. and Khayat, K. (2007), “Yield stress and viscosity equations for mortars and self-consolidating concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37 No. 5, pp. 655–670.
- Phan, T.H. (2006), “Comportement thixotropique des pâtes de bétons auto-plaçants”, *24^{ème} Rencontres Universitaire de Génie civil*, Vol. d.
- Plank, J., Schroefl, C., Gruber, M., Lesti, M. and Sieber, R. (2009), “Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compatibility with Silica Fume”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 7 No. 1, pp. 5–12.
- Plank, J., Zhimin, D., Keller, H., Hössle, F. V. and Seidl, W. (2010), “Fundamental mechanisms for polycarboxylate intercalation into C3A hydrate phases and the role of sulfate present in cement”, *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, Vol. 40 No. 1, pp. 45–57.
- Prince, W., Edwards-Lajnef, M. and Aïtcin, P.-C. (2002), “Interaction between ettringite and a polynaphthalene sulfonate superplasticizer in a cementitious paste”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32 No. 1, pp. 79–85.
- Roussel, N. (2006), “A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36 No. 10, pp. 1797–1806.
- Roussel, N. (2007), “Thixotropie des bétons modélisation et application”, *42^e congrès du Groupe Français de Rhéologie*, France.
- Roussel, N., Lemaître, A., Flatt, R.J. and Coussot, P. (2010), “Steady state flow of cement suspensions: a micromechanical state of the art”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40 No. 1, pp. 77–84.
- Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S. and Brumaud, C. (2012a), “The origins of thixotropy of fresh cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, Vol. 42 No. 1, pp. 148–157.
- Roussel, N., Ovarlez, G., Garrault, S. and Brumaud, C. (2012b), “The origins of thixotropy of fresh cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, Vol. 42 No. 1, pp. 148–157.
- Roussel, N., Stefani, C. and Leroy, R. (2005), “From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 No. 5, pp. 817–822.
- Rupnow, T.D., Scheafer, V.R., Wang, K.J. and Hermanson, B.L. (2007), *Improving portland cement concrete mix consistency and production rate through two-stage*.
- Saak, A.W., Jennings, H.M. and Shah, S.P. (2004), “A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 No. 3, pp. 363–371.

- Saric-Coric, M., Khayat, K. and Tagnit-Hamou, a. (2003), "Performance characteristics of cement grouts made with various combinations of high-range water reducer and cellulose-based viscosity modifier", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33 No. 12, pp. 1999–2008.
- Schindler, a. K., Ruiz, J.M., Rasmussen, R.O., Chang, G.K. and Wathne, L.G. (2004), "Concrete pavement temperature prediction and case studies with the FHWA HIPERPAV models", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26 No. 5, pp. 463–471.
- Schott, H. (1988), "Effect of electrolytes on foaming of nonionic surfactant solutions", *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Vol. 65 No. 10, pp. 1658–1663.
- Schwartzentruber, A. and Catherine, C. (2000), "La mdthode du mortier de bdtton quivalent (MBE) - Un nouvel outil d ' aide h la formulation des bdttons adjuvantds", *Materials and Structures*, Vol. 33 No. 232, pp. 475–482.
- Shayan, A., Diggins, R. and Ivanusec, I. (1996), "Effectiveness of fly ash in preventing deleterious expansion due to alkali-aggregate reaction in normal and stream-cured concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26 No. 1, pp. 153–164.
- Shoukry, S.N., William, G.W., Downie, B. and Riad, M.Y. (2011), "Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete", *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, Vol. 25 No. 2, pp. 688–696.
- Siddique, R., Aggarwal, P. and Aggarwal, Y. (2012), "Influence of water / powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash", *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, Vol. 29, pp. 73–81.
- Sotomayor Cruz, C.D. (2012), *Developpement des betons semi autoplacants a rheologie adaptee pour des infrastructures*, sherbrooke.
- Stencel, J.M., Song, H. and Cangialosi, F. (2009), "Automated foam index test: Quantifying air entraining agent addition and interactions with fly ash–cement admixtures", *Cement and Concrete Research*, Vol. 39 No. 4, pp. 362–370.
- Tanaka M, S, M., A, O. and M, V. (1996), "A new admixture for high performance concrete", *Concrete in the service of mankind*, pp. 291–300.
- Tangtermsirikul, S., Sakamoto, J., Shindoh, T. and Matsuoka, Y. (1991), *Evaluation of resistance to segregation of super workable concrete and the role of a new type of viscosity agent*, *Reports of the Technical Research Institution*, Japan.
- Tanigawa, Y., Mori, H., Yonezawa, T., Izumi, I. and Mitsui, K. (1989), "Evaluation of the flowability of high-strength concrete by L-flow test", *Proceedings of the Annual Conference of the Architectural Institute of Japan*.
- Taylor, H.F.. (1990), *cement chemistry*, Academic press limited.

- Termkhajornkit, P. and Barbarulo, R. (2012), “Modeling the coupled effects of temperature and fineness of Portland cement on the hydration kinetics in cement paste”, *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, Vol. 42 No. 3, pp. 526–538.
- Topçu, İ.B., Bilir, T. and Uygunoğlu, T. (2009), “Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 No. 5, pp. 1947–1953.
- Topçu, İ.B. and Elgün, V.B. (2004), “Influence of concrete properties on bleeding and evaporation”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 No. 2, pp. 275–281.
- Vickers, T.M., Farrington, S. a., Bury, J.R. and Brower, L.E. (2005a), “Influence of dispersant structure and mixing speed on concrete slump retention”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 No. 10, pp. 1882–1890.
- Vickers, T.M., Farrington, S. a., Bury, J.R. and Brower, L.E. (2005b), “Influence of dispersant structure and mixing speed on concrete slump retention”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35 No. 10, pp. 1882–1890.
- Wallevik, J.E. (2006), “Relationship between the Bingham parameters and slump”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36 No. 7, pp. 1214–1221.
- Wallevik, O.H. (1990), *The Rheology of Fresh Concrete and its Application on Concrete with and without Silica Fume*.
- Wang, K., Shah, S.P. and Mishulovich, A. (2004), “Effects of curing temperature and NaOH addition on hydration and strength development of clinker-free CKD-fly ash binders”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34 No. 2, pp. 299–309.
- Wang, X.-Y. and Lee, H.-S. (2012), “Evaluation of the mechanical properties of concrete considering the effects of temperature and aging”, *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, Vol. 29, pp. 581–590.
- De Weerd, K., Haha, M. Ben, Le Saout, G., Kjellsen, K.O., Justnes, H. and Lothenbach, B. (2011), “Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash”, *Cement and Concrete Research*, Elsevier Ltd, Vol. 41 No. 3, pp. 279–291.
- Whiting, D. (1989), “strength and durability of residential concretes containing fly ash, Research and Development Bulletin RD099”, *Portland cement association*, p. 42.
- Wirquin, E., Broda, M. and Duthoit, B. (2002), “Determination of the apparent activation energy of one concrete by calorimetric and mechanical means Influence of a superplasticizer”, Vol. 32, pp. 1207–1213.
- Wirquin, E., Kada, H. and Herin, P. (2008), “Development of a Plane Isothermal Calorimeter: Relating Apparent Activation Energy of Concrete and the Corresponding Mortar”, *Journal of ASTM International*, Vol. 5 No. 1, p. 12.

- Yamada, K. and Hanehara, S. (2001), “Interaction mechanism of cement and superplasticizers — the role of polymer adsorption and ionic conditions of aqueous phase”, *concrete science energy*, Vol. 3, pp. 135–145.
- Yamada, K., Hanehara, S. and Yanagisawa, T. (1999), “Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for highly fluid concrete”, *1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp. 437–448.
- Yamada, K., Ogawa, S. and Hanehara, S. (2001), “Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizer by sulfate ion concentration in aqueous phase”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31 No. 3, pp. 375–383.
- Yang, Q.I. (2012), *Stability of air bubbles in fresh concrete*.

Annexe A : Caractéristiques des matériaux utilisés



Producteur : Carrière de Saint Firmin

Utilisateur : Contrôle interne

Granulats : 4/12,5 semi concassé

Péetrographie : alluvion siliceuse

Elaboration : Semi concassé

Origine : Prélèvement sur bande arrêtée

Partie contractuelle

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Norme

Catégorie

Classe granulaire

4

12.5

Norme XP P 18-545 Article 10 - EN 12620 et EN 13139

Code A

G 14

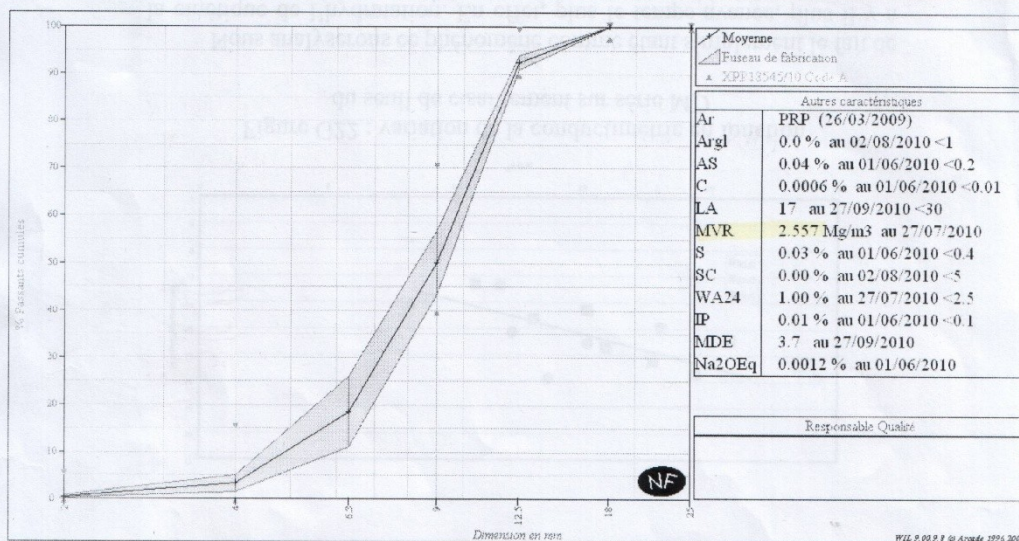
	d/2	d	D/2	D/1.4	D	1.4D	2D	FI	f
	2	4	6.3	9	12.5	18	25		
Etendue e		15		30	9				
Incertitude U	1	5		6	5	1		4	0.3
V.S.S.+U	6	20		76	100			24	1.80
V.S.S.	5	15		70	99			20	1.50
V.S.I.		0		40	90	98	100		
V.S.I.-U		0		34	85	97			
Ecart-type max				9.09					

Partie informative

Résultats de production

du 13/04/10 au 05/10/10

	2	4	6.3	9	12.5	18	25	FI	f
Maximum	1	8	34	63	96	100	100	16	0.07
Xf+1.25xEcart-types	1	5	26	57	94	100	100	16	0.04
Moyenne Xf	0	3	19	50	93	100	100	15	0.01
Xf-1.25xEcart-types	0	2	11	43	91	100	100	14	0.00
Minimum	0	0	5	42	90	100	100	14	0.00
Ecart-type	0.2	1.4	6.0	5.4	1.2	0.0	0.0	1.0	0.020
Nombre de résultats	52	52	52	52	52	52	52	6	52



AFNOR CERTIFICATION - 11 Rue Francis de Pressensé 93571 La Plaine Saint Denis Cedex

densité ?

DENSITÉ ET ABSORPTION SABLE

PROJET : Sable-Groupe
 DESCRIPTION : Provenance:DJL(Demix)
 ANALYSÉ PAR : Ghislaine DATE : 2011/10/27

1 - Ballon #	E		K
2 - Masse ballon+sable sss	684,8		693,7
3 - Masse ballon	178,5		180,1
4 - Masse du sable sss	506,3		513,6
5 - Masse ballon+sable+eau	990,7		995,2
6 - Température (celcius) T	24,3		23
Tare # (pour séchage)			
7 - Masse sable sec+Tare	1037,3		1056,5
8 - Masse de la tare	539,1		551,5
9 - Masse du sable sec	498,2		505
10 -Densité de l'eau à T	0,997221		0,997538
11 -Masse du ballon + eau à T	676,7		678,3
12 -Densité brute Db	2,59		2,57
13 -Densité SSS Dsss	2,63		2,61
14 -Densité apparente Da	2,70		2,68
15 -Absorption	1,63		1,70

$$Db = (9 \times 10) / 0,997538 (4-5+11)$$

$$Da = (9 \times 10) / 0,997538 (9-5+11)$$

$$Dsss = (4 \times 10) / 0,997538 (4-5+11)$$

$$Abs = ((4-9)/9) \times 100$$

$$\text{Densité de l'eau à } 23^{\circ}\text{C} = 0,997538$$

La valeur 11 s'obtient à partir de la courbe d'étalonnage du ballon utilisé

DENSITÉ ET ABSORPTION PIERRE

PROJET : Contrôle
 DESCRIPTION : Pierre-5 14mm
 ANALYSÉ PAR : Rajko + Ghislaine Date:2011-10-27

	Test #1	Test #2
1 - Masse ds l'air sec + tare	2818,4	2706,5
2 - Masse de la tare	545,7	541,7
3 - Masse ds l'air sec	2272,7	2164,8
4 - Masse SSS + tare	2830,9	2718,1
5 - Masse de la tare	545,7	541,7
6 - Masse SSS ds l'air	2285,2	2176,4
7 - Masse SSS dans l'eau	1449,5	1382,2
8 - Température de l'eau	21,1	21,1
9 - Densité de l'eau à T	0,997970	0,997970
11 -Densité brute Db	2,72	2,73
12 -Densité SSS Dsss	2,74	2,74
13 -Densité apparente Da	2,76	2,77
14 -Absorption	0,55	0,54

GRANULAT FIN		MASSE DE PRISE DE L'ESSAI :			684,9
TAMIS (mm)	REFUS (g)	REFUS CUMULÉS (g)	REFUS CUMULÉS (%)	TAMISATS CUMULÉS (%)	
10	0		0,00	100,00	
5	7,3	7,3	1,07	98,93	
2,5	82,8	90,1	13,16	86,84	
1,25	113,8	203,9	29,77	70,23	
0,630	146,4	350,3	51,15	48,85	
0,315	173,8	524,1	76,52	23,48	
0,160	110,0	634,1	92,58	7,42	
0,080	30,4	664,5	97,02	2,98	
PLAT	17,8	682,3	99,62	0,38	
MODULE DE FINESSE DU SABLE :			2,64		

GROS GRANULAT		MASSE DE PRISE DE L'ESSAI (g) :			3494,8
TAMIS (mm)	REFUS (g)	REFUS CUMULÉS (g)	REFUS CUMULÉS (%)	TAMISATS CUMULÉS (%)	
40	0	0	0	100	
28	0	0	0	100	
20	0	0	0	100	
14	228,6	228,6	6,5	93,5	
10	1186	1414,6	40,5	59,5	
5	1830,6	3245,2	92,9	7,1	
2,5	142,5	3387,7	96,9	3,1	
1,25	38,4	3426,1	98,0	2,0	
PLAT	28	3454,1	98,8	1,2	



20 janvier 2012

CERTIFICAT DE CIMENT Usine de Joliette

**Ciment Hydraulique à Usage Général
Type GU**

Période de production : Décembre 2011

Analyses chimiques (%)

Alcalis (Na ₂ O équ.).....	0.90
Perte au feu (≤ 3.0 %).....	2.62
Insolubles (≤ 1.5 %).....	0.55

SiO ₂	20.8
Al ₂ O ₃	4.3
Fe ₂ O ₃	2.4
CaO.....	62.5
MgO (≤ 5.0 %).....	2.2
SO ₃	3.5

Composition minéralogique:

C ₃ S.....	54
C ₂ S.....	19
C ₃ A.....	7.2
C ₄ AF.....	7.4

Propriétés physiques

Finesse: Blaine.....	397 m ² /kg
retenu 45 µ (≤ 28 %).....	6 %

Expansion à l'autoclave (≤ 1.0 %)..... (A300+B5)	0.02 %
Expansion dans l'eau (≤ 0.020 %)..... (A300+C5)	0.014 %

Temps de prise:	
Initial (≥ 45 et ≤ 375 minutes).....	165 min.
Final.....	285 min.

Résistance à la compression:

à 3 jours (≥ 14.5 MPa).....	27.1 MPa
à 7 jours (≥ 20.0 MPa).....	33.3 MPa
à 28 jours (≥ 26.5 MPa).....	42.0 MPa

Ces résultats attestent que le ciment représenté par l'échantillon ci-dessus satisfait à toutes les exigences de la norme en vigueur CSA A3001-08.

Pour toute information complémentaire concernant
le rapport d'analyses, veuillez contacter
nos services techniques au : 1 866 598-8750, poste 6207
ou : jean-claude.leduc@holcim.com

Annick Tremblay
Chef de section - Qualité



Tél : 03.21.99.67.00
Fax : 03.21.99.67.10

S.A.S. CARRIERES DU BOULONNAIS

62250 FERQUES
R.G. CALAIS B 641 760 660 - APE 142A

Fiche Technique Produit

FILLER CM120 (FS9212)

Référence normative



NF P 18-508

Nature Pétrographique

Calcaire viséen dur compact

Utilisation

Additions calcaires

Spécifications contractuelles :

	0,500	0,250	0,125	0,063	H2O	MBF
Tamis (mm)	500µ	250µ	125µ	63µ		
Vss				97.0	1.00	10.00
Vsl	100.0	99.0	96.0	87.0		
Vss + U				100.0	4.00	12.00
Vsl - U	97.0	96.0	93.0	84.0		
Sr max						

Résultats :

Granularité et propreté : Période du 07/09/03 au 07/09/04 (12 mois)

Autres caractéristiques : Période du 07/09/03 au 07/09/04 (12 mois)

	0,500	0,250	0,125	0,063	H2O	MBF
Tamis (mm)	500µ	250µ	125µ	63µ		
max				96.1	0.63	1.64
Xr+1,25 Sr				94.6	0.43	
moyenne Xr	100.0	99.9	98.8	91.8	0.29	1.16
Xr - 1,25 Sr	100.0	99.8	98.0	89.0		
min	100.0	99.5	97.8	87.9		
Ecart type Sr	0.00	0.09	0.66	2.23	0.112	
nb. valeurs	48	48	48	48	48	2

Autres Caractéristiques	Valeur	Dernier Essai
Carbonates	97,57	12/07/04
CaCO3	94,22	12/07/04
S	0,02%	12/07/04
Cl-	0,003%	15/12/03
SO3	0,06%	15/12/03
Blaine	362m2/kg	04/12/03

Indice d'activité: 0,86

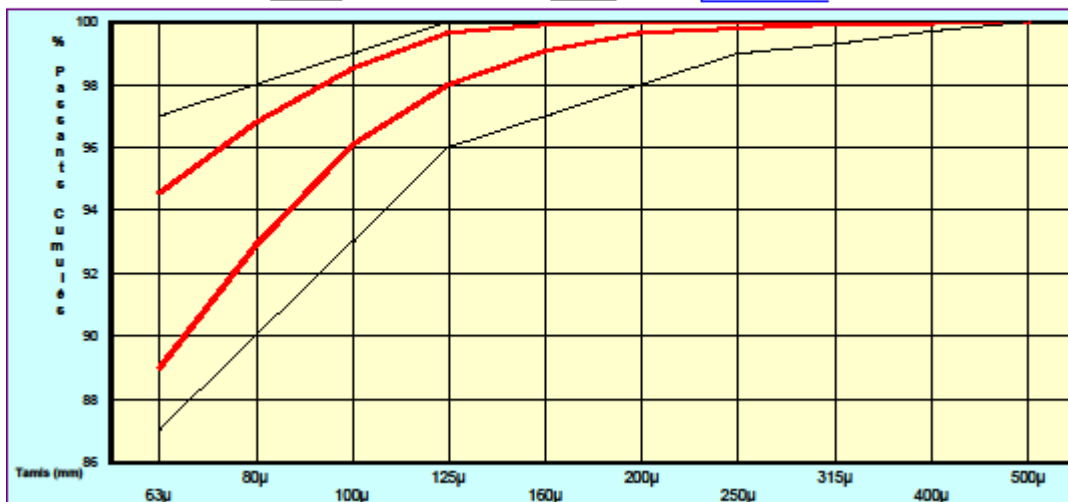
Matières organiques: 0,02%

Date et visa du responsable laboratoire

08/09/04

Fiche n° : 494

Fuseaux de régularité et de fabrication :



Nos produits étant sujets à évolution, merci de nous contacter pour tout engagement ou durée de validité

Fumées de silice régulières
Analyse chimique

SiO ₂	93.0 % min.
Fe ₂ O ₃	0.80 % max.
Al ₂ O ₃	0.40 % max.
CaO	0.60 % max.
MgO	0.60 % max.
Na ₂ O	0.20 % max.
K ₂ O	1.2 % max.
C _{libre}	2.0 % max.
SO ₃	0.40 % max.
PAF	3.5 % max.

Caractéristiques physiques

Surface spécifique (m ² /kg)	18,000 – 22,000
Densité relative	2.2
Densité apparente (kg/m ³)	250 – 325
Finesse (diamètre moy. en µm)	0.1 – 0.2
Pourcentage passant 45 µm (%)	95 – 100
Forme des particules	Sphérique
Structure	Amorphe
Norme canadienne	CSA – A3001-03

SILICOLINE®

■ Cendre volante silico-alumineuses issue de la combustion de houille pulvérisée en centrale à flamme à la température d'environ 1400°C

■ La silicoline® se présente sous la forme de poudre grise, douce au toucher, ensemble de sphères pleines ou creuses, de nature vitreuse

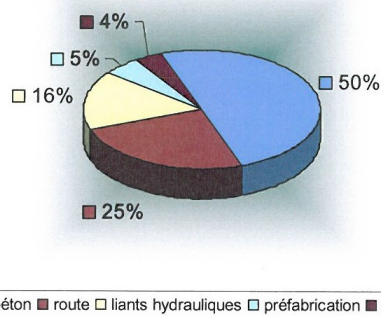
■ La silicoline est disponible sèche ou humide, en vrac ou conditionné en big bag, et se transporte par camion par bateau ou par fer



Photo de la structure microscopique d'une silicoline®

ANALYSES		Moyenne
PHYSIQUES		
Perte au feu # Carbone résiduel	%	2 à 7
Masse volumique	t/m3	2.1 à 2.3
Granulométrie		
passants à 45 µm	%	65 à 75
passants à 80 µm	%	75 à 90
passants à 200 µm	%	96 à 99
passants à 315 µm	%	100
CHIMIQUES		
SiO2	%	50
Fe2O3	%	8,5
Al2O3	%	29
MgO	%	3
MnO2	%	0,5
CaO total	%	3
CaO libre	%	0,15 à 1
Na2O	%	0,7
K2O	%	4,5
SO3	%	0,6
TiO2	%	1,0
Chlore	%	0,04
P2O5	%	0,25
Total Alcalins disponibles	%	0,05 à 0,15

LES DIFFERENTES VALORISATIONS



PROPRIETES POZZOLANQUES

BETON

Selon la norme EN 196.1

Détermination résistances mécaniques

Indice activité à 28 jours en % = 75* à > 90

Indice activité à 90 jours en % = 85* à >100

*minimum exigé par EN 450-1 +A1

ROUTE

Selon norme NF P 98 111

Essais de réactivité des cendres silico-alumineuses à la chaux

Indice pouzzolanique : à 60 jours MPa > 3.5 et à 360 jours MPa >10

PROPRIETES PHYSIQUES

Densité	En Vrac	Sèche non tassée	0,55 à 0,85
		Sèche tassée	0,8 à 1
		Humide	0,95 à 1,2
Masse volumique	t/m³	EN 196-6	2,1 à 2,4
Finesse Blaine	cm²/g		1900 à 2500



**An Environment
of Exceptional
Solutions**

Registered to:
ISO 9001:2000

3 Spectacle Lake Drive
Dartmouth, Nova Scotia, Canada B5B 1W8
www.jacqueswhitford.com

Bus: 902 468 7777
Fax: 902 480 3009

Mr. Steve Gasiorowski
Separation Technologies Canada Ltd.
1558 Main Street
Belledune, NB E8G 2M3

Project N°: NSD19558

Project: 2007 QUALITY ASSURANCE TESTING Source: Belledune August 18 – August 31 Sample
Subject: COMPLIANCE TESTING OF CLASS F FLY ASH Date Received: September 6, 2007

CHEMICAL REQUIREMENTS	Result	Specification Limits for Class F Fly Ash	
		ASTM C618-03	CSA A3001-03
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % (53.89 + 20.97 + 10.15)	85.01	Minimum 70	N/A
SO ₃ , %	1.36	Maximum 5.0	Maximum 5.0
CaO, %	2.93	N/A	Maximum 8.0
Moisture Content, %	0.05	Maximum 3.0	Maximum 3.0
Loss on Ignition, %	1.72	Maximum 6.0	Maximum 8.0
Available Alkalies, as Na ₂ O% / Total Alkalies	0.64/4.31	N/A	N/A
PHYSICAL REQUIREMENTS			
Strength Activity Index, % with Portland Cement at 7 days	95.2	Min. % of Control, 75	N/A
with Portland Cement at 28 days	109.7	Min. % of Control, 75	Min. % of Control, 75
Fineness, % Retained on 45 µm sieve	9.9	Maximum 34	Maximum 34
Soundness, Autoclave Expansion or Contraction, %	-0.02	Maximum 0.8	Maximum 0.8
Water Requirement, % of Control	93.8	Maximum 105	N/A
Density, g/cm ³	2.53	N/A	N/A
Control of Alkali Aggregate Reactivity Mortar Bar Expansion at 14 days, @ 20 % Replacement, %	—	Maximum 0.10 %	Maximum 0.10 %
UNIFORMITY REQUIREMENTS			
Density, Variation from Average, %	1.6	Maximum 5.0	N/A
Fineness, 45 µm sieve, Variation from Average, %	1.1	Maximum 5.0	N/A
Multiple Factor, % (LOI x Fineness)	17.0	Maximum 255	N/A

The above results indicate that the fly ash represented by this sample complies with the requirements of ASTM C618-03 and CSA A3001-03 for Class F Fly Ash.

Gordon H. Leaman, P.Eng
Principal

Engineering, Scientific, Planning and Management Consultants

Fumées de silice régulières
Analyse chimique

SiO ₂	93.0 % min.
Fe ₂ O ₃	0.80 % max.
Al ₂ O ₃	0.40 % max.
CaO	0.60 % max.
MgO	0.60 % max.
Na ₂ O	0.20 % max.
K ₂ O	1.2 % max.
C _{libre}	2.0 % max.
SO ₃	0.40 % max.
PAF	3.5 % max.

Caractéristiques physiques

Surface spécifique (m ² /kg)	18,000 – 22,000
Densité relative	2.2
Densité apparente (kg/m ³)	250 – 325
Finesse (diamètre moy. en µm)	0.1 – 0.2
Pourcentage passant 45 µm (%)	95 – 100
Forme des particules	Sphérique
Structure	Amorphe
Norme canadienne	CSA – A3001-03



South Chicago Plant

MILL TEST CERTIFICATE - NewCem

Reference Results

Fineness:
Blaine
(m²/kg) 345*
45 micron
retained (%) 6*

Compressive Strength (Mpa)

	Actual	Limit
7 Day	31.6	na
28 Day**	39.2	35 minimum

CHEMICAL

	Actual	Limit
Na ₂ O _{equiv} (%)	0.83*	0.6 to 0.9

Sample Identification

Sample# na

August 2008
Mill Run Composite

Test Results

Fineness:
Blaine
(m²/kg) 533
45 micron
retained (%) 0.9

Compressive Strength (Mpa)

	Actual	Limit
7 Day	32.8	
28 Day**	47.9	

Slag Activity Index (%):

	Actual	Limit
7 Day	104	na
28 Day**	122	80 minimum

	Actual	Limit
Air Content, (%)	6.1	na

S.G. NewCem 2.99

Autoclave Expansion (%) 0.5 maximum

CHEMICAL

	Actual	Limit
Sulfide Sulfur (S), (%)	1.33	2.5 maximum
SO ₃ (%)	0.00	4.0 maximum

* Predetermined value

** Result is for July 2008

We hereby certify that the slag represented by the above chemical and physical analysis meets the requirements of CSA A23.5-98 and CSA A3001-03 for Type S Supplementary Cementing Material - Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBFS).

Great Lakes Region
South Chicago Plant
2150 E. 130th St., Chicago, IL 60633
Telephone (773) 646-3150

Quality Control Supervisor

9/14/2008

Date

Annexe B : Data

Série MBE	Température (T°C)	seuil (Pa)	viscosité (Pa.s)
	8	17,9	4,5
MBE-B-CV-PC1	15	11,7	4,5
	22	6,2	3,8
	29	6,5	3,5
	36	17,6	4,6
MBE-B-FC-PC1	8	4,2	3,6
	15	9,9	4
	22	14,3	2,8
	29	15,5	2,4
	36	12,3	2,6
MBE-B-CV-PNS	8	39	5,8
	15	19	5,3
	22	24,3	3,7
	29	17,6	4,3
	36	12,8	4,5
MBE-B-FC-PNS	8	56,4	4,9
	15	33,6	4,4
	22	17,5	4,4
	29	17,2	3,9
	36	11,8	3,8
MBE-I-CV-PC1	8	53,5	3,9
	15	54,3	4,1
	22	39	5,7
	29	47,9	4,8
	36	40	3,1
MBE-I-LT-PC1	8	62,3	5,3
	15	52	2,8
	22	41,8	4
	29	46	4,3
	36	42	2,8
MBE-I-CV-PNS	8	48,8	3,6
	15	65	3,6
	22	37,5	3,2
	29	43,7	3,1
	36	42	2,5
MBE-I-LT-PNS	8	67,6	2,9
	15	56,6	1,8
	22	32,4	2,8
	29	33	2,5
	36	35	2,3

Comparaison du PC % à différentes températures par rapport au PC % à la température normale de 22°C

		T°C	PC% _(T°C) / PC% _(22°C)
MBE-B-PC1	MBE-B-CV	8	0,75255102
		15	0,86734694
		22	1
		29	1,14795918
		36	1,41071429
	MBE-B-FC	8	0,72916667
		15	0,875
		22	1
		29	1,14583333
		36	1,33125
MBE-P-PC2	MBE-P-CV	8	0,80487805
		15	0,86585366
		22	1
		29	1,19817073
		36	1,36890244
	MBE-P-FS	8	0,8815427
		15	0,92286501
		22	1
		29	1,19834711
		36	1,51790634
MBE-I-PC1	MBE-I-CV	8	0,79227053
		15	0,83574879
		22	1
		29	1,10628019
		36	1,14492754
	MBE-I-LT	8	0,81707317
		15	0,94756098
		22	1
		29	1,13414634
		36	1,26829268

Comparaison du PNS % à différentes températures par rapport au PNS % à la température normale de 22°C

		T°C	PNS % (T°C) / PNS% (22°C)
MBE-B-PNS	MBE-B-CV	8	0,93710692
		15	0,96352201
		22	1
		29	1,00628931
		36	1,02893082
	MBE-B-FC	8	0,97560976
		15	0,92682927
		22	1
		29	1,07142857
		36	0,98083624
MBE-I-PNS	MBE-I-CV	8	1,31282051
		15	1,01880342
		22	1
		29	0,98974359
		36	1,03760684
	MBE-I-LT	8	1,17697595
		15	1,07388316
		22	1
		29	1
		36	1

Comparer l'AEA % à différentes températures par rapport à l'AEA % à la température normale à 22°C

		T°C	AEA% (T°C) / AEA% (22°C)
MBE-I-PC1	MBE-I-CV	8	0,1875
		15	0,5
		22	1
		29	1,1875
		36	1,6875
	MBE-I-LT	8	0,22222222
		15	0,22222222
		22	1
		29	1,33333333
		36	2,22222222
MBE-I-PNS	MBE-I-CV PNS	8	0.82051282
		15	/
		22	1
		29	/
		36	0.143589744
	MBE-I-LT PNS	8	0,8
		15	0,91428571
		22	1
		29	1,05714286
		36	1,2

Comparaison du flux maximal à différentes températures par rapport au flux maximal à la température normale de 22°C

		Température (T°C)	Flux maxi/Flux maxi à 22°C
MBE-B-CV	MBE-B-PC1	8	0,36308585
		15	0,62570491
		22	1
		29	1,34248818
		36	1,79951238
	MBE-P-PNS	8	0,35621503
		15	0,64180269
		22	1
		29	1,45131086
		36	1,83049977
MBE-B-FC	MBE-B-PC1	8	0,4
		15	0,74
		22	1
		29	2,51
		36	3,98333333
	MBE-B-PNS	8	0,38333333
		15	0,66666667
		22	1
		29	2,05333333
		36	3,65666667
MBE-P-PC2	MBE-P-CV	8	0,375
		15	0,65625
		22	1
		29	1,3125
		36	1,840625
	MBE-P-FS	8	0,37356322
		15	0,73850575
		22	1
		29	2,35344828
		36	2,5862069

Comparaison de la f_c à différentes températures par rapport à la f_c à la température normale de 22°C

		T°C	$f_c (T°C) / f_c (22°C)$
MBE-B-PC1	CV	8	0,17978088
		15	0,31324701
		22	1
		29	1,34611554
		36	1,59711155
	FC	8	0,18659295
		15	0,4975812
		22	1
		29	1,69384934
		36	1,64409122
MBE-B-PNS	CV	8	0,16453382
		15	0,33516149
		22	1
		29	1,51736746
		36	1,93540524
	FC	8	0,19000617
		15	0,4503393
		22	1
		29	1,58544109
		36	1,6668723
MBE-P-PC2	CV	8	0,21704815
		15	0,40252565
		22	1
		29	1,265588
		36	1,31018153
	CV+FS	8	0,34422404
		15	0,65052509
		22	1
		29	1,30017503
		36	1,30105018

		T°C	$f_c (T^{\circ}\text{C})/f_c (22^{\circ}\text{C})$
MBE-I-PC1	CV	8	0,17058824
		15	0,47058824
		22	1
		29	1,25882353
		36	1,41764706
	LT	8	0,17834395
		15	0,57324841
		22	1
		29	1,40764331
		36	1,77707006
MBE-I-PNS	CV	8	0,10135135
		15	0,41216216
		22	1
		29	1,36486486
		36	1,35135135
	LT	8	0,10526316
		15	0,43421053
		22	1
		29	1,42763158
		36	1,85526316